国家自然科学基金项目（41272170）资助

松辽盆地
梨树断陷油气生成

张　敏　李洪波　陈小慧　赵红静　著

SONGLIAO PENDI
LISHU DUANXIAN YOUQI SHENGCHENG

石油工业出版社

松辽盆地

梨树断陷油气生成

责任编辑：庞奇伟 / 责任校对：陈 丽 / 封面设计：乘设伟业



定 价：50.00元

国家自然科学基金项目(41272170)资助

松辽盆地梨树断陷油气生成

张　敏　李洪波　陈小慧　赵红静　著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书以梨树断陷烃源岩、原油与天然气为研究对象，从宏观与微观、定性与定量、地质与地球化学等相结合的研究思路出发，对断陷内烃源岩发育与展布、烃源岩特征与评价、油气组成与成因类型及其油气源精细对比进行了系统的综合研究；在此基础上，结合油藏烃类的非均质性、储层流体包裹体特征以及盆地模拟成果，指出了油气运移方向与途径，确定了油气聚集期次，建立了梨树断陷油气运聚模式。

本书可供地球化学、石油地质学等专业的科研人员及有关院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

松辽盆地梨树断陷油气生成/张敏等著.
北京:石油工业出版社,2014.4
ISBN 978-7-5021-9968-5

Ⅰ.松…
Ⅱ.张…
Ⅲ.松辽盆地-断陷盆地-岩性油气藏-石油生成-研究
Ⅳ.P618.130.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 018583 号

出版发行:石油工业出版社
(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)
网 址:www.petropub.com.cn
编辑部:(010)64523543 发行部:(010)64523620
经 销:全国新华书店
印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2014 年 4 月第 1 版 2014 年 4 月第 1 次印刷
787×1092 毫米 开本:1/16 印张:10.5
字数:268 千字

前　　言

梨树断陷位于松辽盆地的南部，是一个富油气断陷。经过40多年的勘探，截至2010年底，已发现各种类型油气田13个，展示出良好的油气勘探前景。梨树断陷与中国东部断陷盆地一样存在典型的“下断上坳”的结构特征，目前该断陷在坳陷层的勘探程度较高，勘探的对象主要以岩性油气藏与地层油气藏为主。但是随着勘探程度的不断深入，勘探对象已由浅层的坳陷层转移到深层的断陷层。由于断陷层勘探程度与研究水平相对较低，尤其在油气成因及运聚规律研究方面表现为“四多、四低”现象。即油气资源量多、勘探程度与资源探明率低；烃源岩层系多、有效烃源岩与主力烃源岩研究程度低；油气类型多、油气成因与分布规律研究程度低；油藏类型多、油气运聚规律研究程度低。因此，开展梨树断陷油气生成机理与成藏地球化学规律的深入研究，既是梨树断陷油气勘探的生产需求，其研究成果也将丰富陆相断陷盆地油气生成理论，并对我国东部断陷盆地深层油气的勘探起到指导与借鉴作用。

在撰写本书的过程中，笔者从宏观与微观、定性与定量、地质与地球化学等相结合的研究思路出发，对研究成果进行了系统地丰富完善与总结提升，分别在烃源岩特征与评价、油气组成与成因类型以及油气运移成藏规律等方面取得了一系列新认识与新成果。

（1）对梨树断陷不同地区不同层位烃源岩进行了系统评价，总结出烃源岩的空间展布特征，明确了梨树断陷存在沙河子组、营城组和登娄库组三套泥质烃源岩。其中沙河子组和营城组烃源岩为优质烃源岩，登娄库组烃源岩次之。沙河子组和营城组烃源岩不仅厚度大且有机质丰度高、有机质类型以$Ⅱ_2$—Ⅲ型干酪根为主，有机质热演化达到成熟—高成熟阶段，其优质烃源岩主要发育在桑树台洼陷带。此外，不同地区不同层位烃源岩可溶有机质生物标志化合物组合特征亦存在明显的差异。

（2）根据生物标志化合物组合特征，梨树断陷原油划分为两种成因三种类型：第一类成因的原油主要储层是登娄库组及以上地层，属正常密度的成熟原油，并具有典型半咸水湖相原油生物标志物组合特征，即长链三环萜烷含量低且不发育、C_{30}重排藿烷含量不高且具有相当丰富的伽马蜡烷、C_{27}—C_{29}规则甾烷中C_{29}甾烷含量略占优势；第二类成因的原油主要储层是沙河子组及以下地层，属高成熟的轻质油与凝析油，原油生物标志物组合特征为长链三环萜烷含量高且极其发育、$C_{29}Ts$和C_{30}重排藿烷含量丰富、C_{27}—C_{29}规则甾烷中C_{29}甾烷含量占绝对优势；第三类原油没有成因上的意义，是第一类成因原油与第二类成因原油的混合产物。

（3）梨树断陷天然气为有机成因的混合气，可分为两种类型：一是高—过成熟的煤成气与油型气的混合，主要见于孤家子气田、后五家户气田和新立气田，后五家户的天然气成熟度相对略低；二是不同成熟度的油型气的混合，主要见于北部斜坡、中央构造带的八屋油气田、四五家子油气田、后五家户油气田以及东南斜坡带金山地区和李家屯地区。

（4）精细油气对比结果表明，储集在登娄库组及以上地层的成熟原油主要来源于营城组中—下部烃源岩，而聚集在沙河子组及以下地层的高成熟原油来源于沙河子组中—上部烃源

岩,混源油则是上述两套烃源岩的混合产物。区域分布上,来源于营城组中—下部烃源岩的成熟原油主要分布于泉头组和登娄库组等较浅层系,平面上主要分布于秦家屯和四五家子;来源于沙河子组中—上部烃源岩的高成熟原油主要分布于营城组和沙河子组等较深层系,平面上主要分布于八屋北部地区、皮家、李家屯和七棵树部分地区。油型气主要源于断陷中心的营城组和沙河子组烃源岩,而煤成气主要来源于断陷中心的沙河子组煤系烃源岩。

(5)梨树断陷油气藏的形成具有三期成藏期,分别是登娄库期、泉头期和泉头末期—嫩江期,不同地区不同层位成藏期存在明显差异。秦家屯地区登娄库组油气藏主要形成于泉头末期,营城组油气藏主要在泉头中期成藏,沙河子组油气藏主要在泉头早期成藏;八屋地区营城组油藏主要成藏期为泉头期,沙河子组油气藏成藏于登娄库末期和泉头期;北部斜坡营城组油气成藏期主要为泉头期;双龙地区登娄库组油气藏主要在泉头末期—嫩江期成藏;后五家户地区登娄库组油气藏主要成藏期为泉头期,而营城组油藏主要在登娄库期聚集成藏。

(6)梨树断陷原油含氮化合物绝对浓度、相对比值以及成熟度变化特征,进一步确定了原油横向上主体沿西南—东北方向向周缘斜坡区侧向运移,纵向上沿断层向上垂向运移的特征。并且建立了梨树断陷油气运聚模式,指出油气下一步勘探的有利地区。

全书共分六章,其中第一章由张敏执笔,第二章、第三章由李洪波执笔,第四章由赵红静和陈小慧执笔,第五章、第六章由陈小慧执笔。全书由张敏、李洪波最终定稿与统稿。

在本书的编写以及项目的研究工作中,得到了中国石油化工股份有限公司科技部、中国石油化工股份有限公司东北油气分公司领导与专家的支持与帮助,本书的出版还得到长江大学油气资源与勘探技术教育部重点实验室的资助,在此笔者向所有曾给予关心、帮助与支持的领导与专家表示衷心的感谢。

目　　录

第一章　基本地质特征

梨树断陷是松辽盆地的一个次级构造单元，构造上位于松辽盆地东南隆起区（图1-1），西以桑树台断裂为界，北接杨大城子凸起，南临断陷深凹区，东临太平庄—双龙构造带，是一个断坳叠置型盆地，面积2346km^2。行政区隶属于吉林省公主岭市与梨树县境内，地理位置上位于吉林省公主岭市秦家屯镇和八屋镇之间。

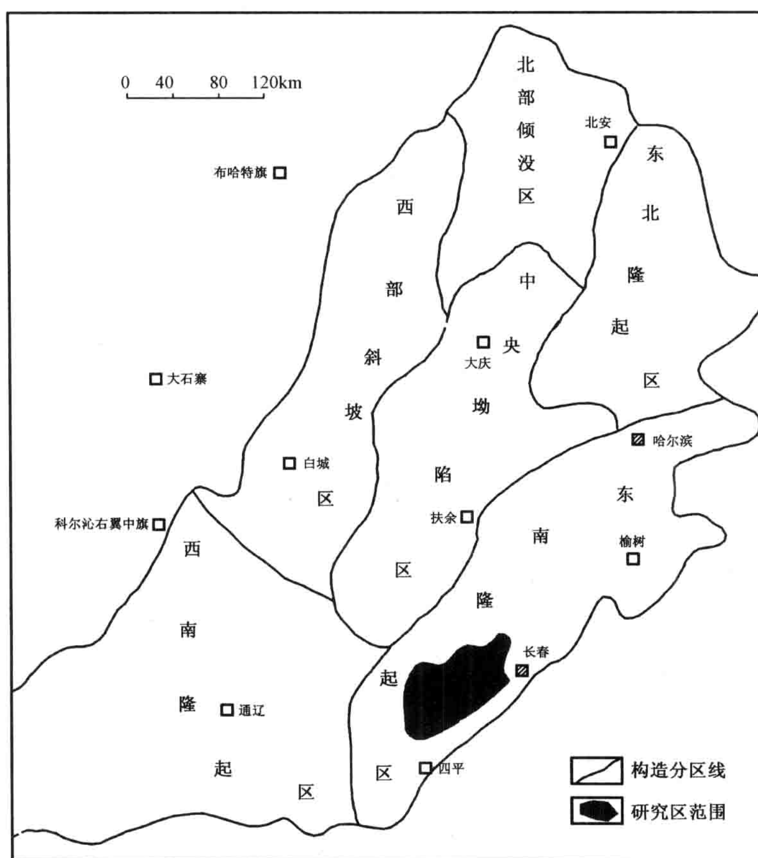


图1-1　梨树断陷地理位置图

梨树断陷位于松辽盆地南部断陷群的南端（图1-2），为晚侏罗世以来发育形成的以西部弧形断裂为边界的箕状断陷盆地，是松辽盆地断陷持续时间最长、地层发育最齐全、沉积最厚、埋深最大、有机质演化程度最高的断陷盆地之一，断坳层叠置，最大厚度逾万米。梨树断陷已发现下白垩统沙河子组（四五家子油气层）、营城组（五家子油气层）、登娄库组（小城子油气层）、泉头组（农安油气层、杨大城子油气层）等五个含油气层系。

图1-2　松辽盆地南部断陷盆地分布图

第一节　构造演化

梨树断陷的形成与演化过程与整个松辽盆地相同，经历了多期构造运动，断陷期和坳陷期地层沉积发育过程、现今分布特征的差异性，揭示了不同的构造演化阶段，总体上经历了断陷期、坳陷期和反转期等几个不同的演化时期，其中断陷期又可分为初始断裂期、强烈断陷期、断坳转化期三个阶段。影响本区的主要构造运动有火石岭末期构造运动、营城末期构造运动、登娄库末期构造运动及明水末期的构造运动（表1-1）。图1-3展示了梨树断陷主要沉积时期构造演化特征。

表1-1　梨树断陷构造演化分析表

层位	构造演化阶段	构造作用	产物	接触关系
古近系—第四系	第二期坳陷	区域升降	平层	角度不整合
明水组—泉头组	第一期强坳陷	沉降	区域大型宽缓背斜	角度、平行不整合
登娄库组	断坳转换	左旋挤压走滑	三个NE向走滑带	角度、平行不整合
营城组 沙河子组	深断陷	EW拉张	SN向断陷	角度、平行不整合
火石岭组	初断陷	NW—SE拉张	NE向断陷群	角度不整合
基底	多期拼接基底		复杂基底	

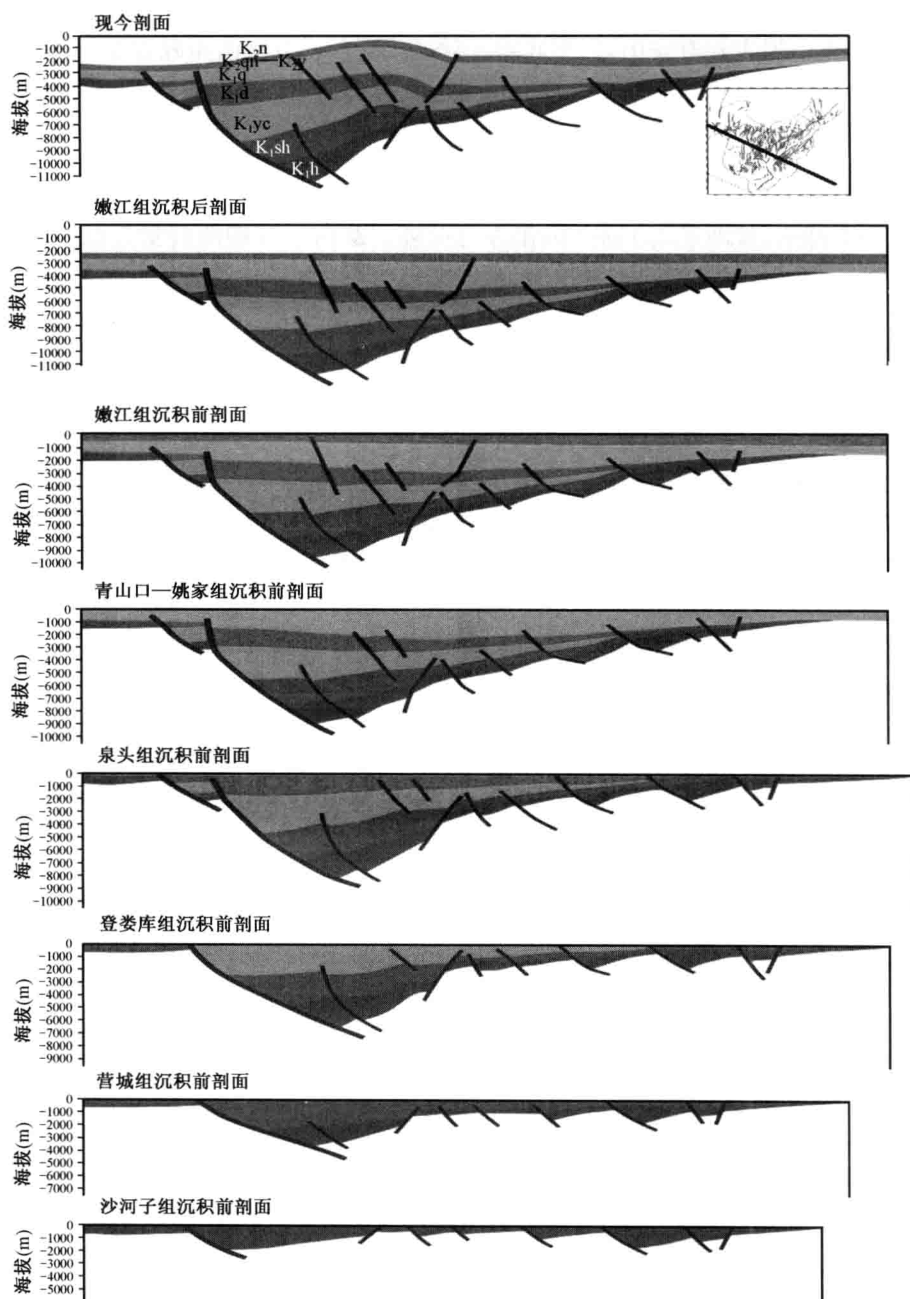


图 1-3 梨树断陷构造演化图

一、初始裂陷期(火石岭期)

初始裂陷期为火石岭组沉积期,该期为初始断裂形成时期,也是梨树断陷盖层中火山岩主要发育时期,沉积环境主要为火山岩台地的滨—浅湖相。此时早期断裂开始活动,受 NW—SE 向拉张应力作用,形成一系列 NNE、NE 向断层,发育了多米诺式的 NE 走向早期小型断陷盆地群。但火石岭组并没有受控陷断裂控制,在古地形低凹处沉积厚度较厚,而在古地形较高处则

沉积较薄。这个时期的断裂只是伴随着基底断裂活动,沿断裂形成了以裂隙式喷发为主的火山岩沉积,喷出火山岩主要有安山岩、玄武岩、流纹岩、凝灰岩及火山角砾岩等。初始裂陷期构造运动不稳定,加之火石岭末期发生一次区域性较大的挤压抬升作用,在 T_4^2 界面表现为火石岭组的剥蚀现象。

二、强烈断陷期(沙河子—营城期)

沙河子—营城期,盆地进入了强烈断陷发育时期。沙河子时期断裂受近东西向的张应力作用,以桑树台断裂为边界,断陷不断扩展,是以构造沉降为主的时期;地层持续伸展沉降,是断陷盆地生长最快的时期。初始裂陷期形成的断裂有的继续活动,有的趋于消亡,其中在西丁家以北、桑树台、秦家屯、八屋—四五家子和双龙地区由于 NE 向断层继续活动,形成了一系列次级沉降中心。

营城期在张应力作用下继续活动,该时期继承了沙河子期沉积特征继续发生沉积作用,但沉积范围变大,有些隆起的部位也下降接受沉积,断陷间隆起区变窄,为箕状断陷的定型期,形成整体上以单一主控断层控制的西断东超的断陷结构,但营城组并不严格受控陷断裂控制,而且地层厚度有从西向东变薄的趋势。双龙地区由于远离桑树台断层的控制,仍然继承了火石岭组沉积时期的格局,洼陷呈北东向展布。因此该时期是裂陷活动开始减弱的时期,营城末期构造运动在区域性的左旋走滑背景下,局部抬升接受剥蚀,断裂活动明显减弱。

三、断坳转化期(登娄库期)

登娄库组沉积期地层沉降开始摆脱断裂的控制,断陷期的断裂活动进一步减弱,从全区来看开始形成统一的沉降中心,地层厚度全区变化不大,岩性主要为泥岩、砂岩和砂砾岩互层,水体变浅,代表了河流、三角洲相的沉积环境。到登娄库末期构造运动为全区性的左旋走滑运动,受这次构造运动的影响,梨树断陷形成了后五家户、小五家子、双龙、艾家窝堡、老公林子等圈闭构造,这次构造运动对梨树断陷的影响较大,地震剖面上表现为清晰的超覆和削蚀现象。结束了梨树断陷的断槽沉积,进入广盆式的坳陷期沉积。登娄库末期在左旋挤压应力作用下出现走滑,形成了三个 NE 向的挤压走滑带:小宽走滑带、皮家走滑带和秦家屯走滑带。此时期为断坳转化期,登娄库末期构造运动结束了断陷期沉积,地层开始进入坳陷期。

四、坳陷期(泉头—嫩江期)

地层进入坳陷期之后,以沉积为主,泉头期开始,梨树断陷进入广盆式沉积,这个时期断裂基本上停止了活动,地震反射特征明显以超覆和平行接触为主。沉积从泉头期持续到嫩江期,嫩江末期以后地层缺失。到明水末期,随着构造运动地层结束了坳陷期沉积。

五、构造反转期(明水末期)

该期构造运动从晚白垩世燕山运动四幕时期开始,到燕山运动五幕时期(明水末期),梨树断陷沿中央构造带整体抬升,由于本区嫩江组以上地层没有沉积记录,结合大的区域背景来看,应该是明水末期构造运动改造的结果。

明水末期构造反转运动,造成孤家子、秦家屯以东地区嫩江组以上地层被整体剥蚀,与整个松辽盆地一样,在区域挤压应力场的作用下,坳陷期的厚层沉积体挤压抬升,形成以大型宽缓背斜为主的挤压构造,断层并不十分发育。梨树断陷表现为沉积盖层的挤压变形,沉积厚度较大的区域形成隆起,背斜规模大,横跨深层多个构造单元。嫩江组只在桑树台深凹区附近有钻井揭露。该期构造运动是从整个松辽盆地大的区域背景来推断的,应该是一期强烈的压扭

运动,对东南隆起区早期形成的油气藏起着破坏和重新改造的作用。

根据断陷构造演化特征,本书将梨树断陷划分为四个构造区,桑树台洼陷带位于最西侧,自南向北三个构造区分别为东南斜坡带、中央构造带和北部斜坡带(图 1 –4)。

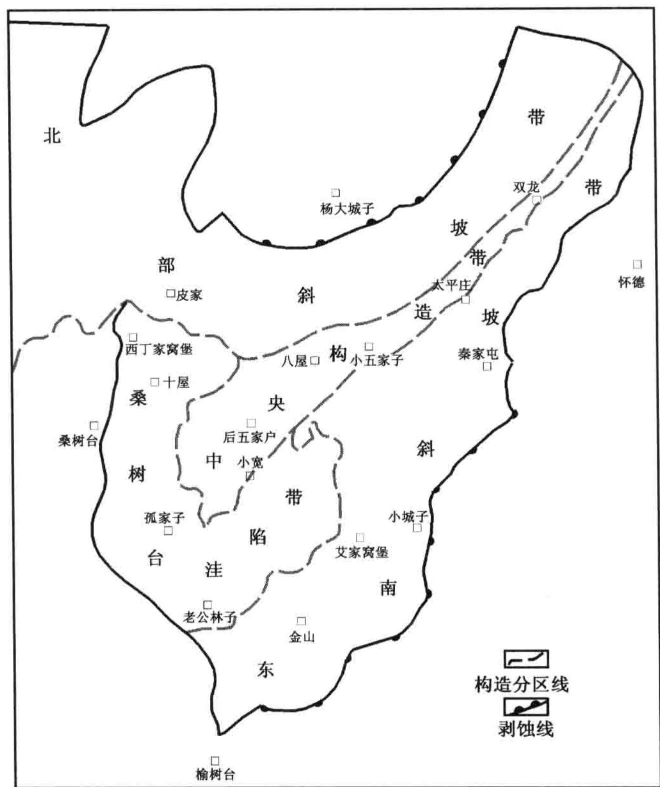


图 1 –4　梨树断陷构造分区图

桑树台洼陷带受桑树台控盆大断裂的控制,在桑树台断裂东侧呈 SN 向展布,被皮家断裂分为北部的苏家屯洼陷和南部的桑树台次洼两个主体部分。该区带西缘发育大型斜坡扇体和深洼水下扇储集体,冲积扇体发育,以粗碎屑沉积为主。由于目的层埋藏较深,热演化程度高,烃源岩大部分处于高演化和过演化阶段,目前尚无钻井钻至营城组和沙河子组。该区带是大型水下扇勘探和上升盘潜山勘探的重要靶区。

中央构造带位于梨树断陷腹地,呈 NNE 向展布,沿小宽—八屋—太平庄一带纵贯梨树断陷,西南倾没于深凹之中。该构造带西南紧临沙河子组—营城组烃源岩沉降中心,沙河子组和营城组烃源岩较发育。构造带上发育有多期次的 NE 和 SN 向两组断层,同时深层发育有辫状河三角洲、湖底扇砂体,断层和砂体是油气纵横向运移的良好通道。该构造带主要发育背斜、断背斜、断块、断鼻等各种类型构造圈闭,此外发育岩性、地层和潜山等圈闭,具有较好的圈闭条件。

北部斜坡带位于梨树断陷北缘,紧邻杨大城子南侧,呈弧形 EW 向展布。区带南临生烃中心,为油气长期运聚指向区,是油气有利的勘探区块。营城组、沙河子组为深湖—半深湖—浅湖相沉积,泥岩发育,加之地层逐层超覆尖灭,具有形成构造—地层—岩性复合圈闭的优越地质条件,后期改造轻微,保存条件良好。

东南斜坡带沿金山—小城子—秦家屯—七棵树一带及东南部展布。在基底古斜坡背景上,断陷层逐层超覆尖灭,坡度较缓。南部为泛滥平原相沉积,北部营城组、沙河子组为浅湖—半深湖相沉积,发育两个大型早期褶皱构造,即秦家屯构造和艾家窝堡构造带。其中秦家屯构造为一大型鼻状构造,油气成藏条件十分有利,具有形成中型油气藏的地质背景和条件。

目前,中央构造带已发现四五家子、十屋和太平庄三个油田,孤家子、后五家户、八屋三个气田;东南斜坡带发现秦家屯油田和七棵树油田,以及小城子气田;北部斜坡带发现皮家气田(图1-5)。

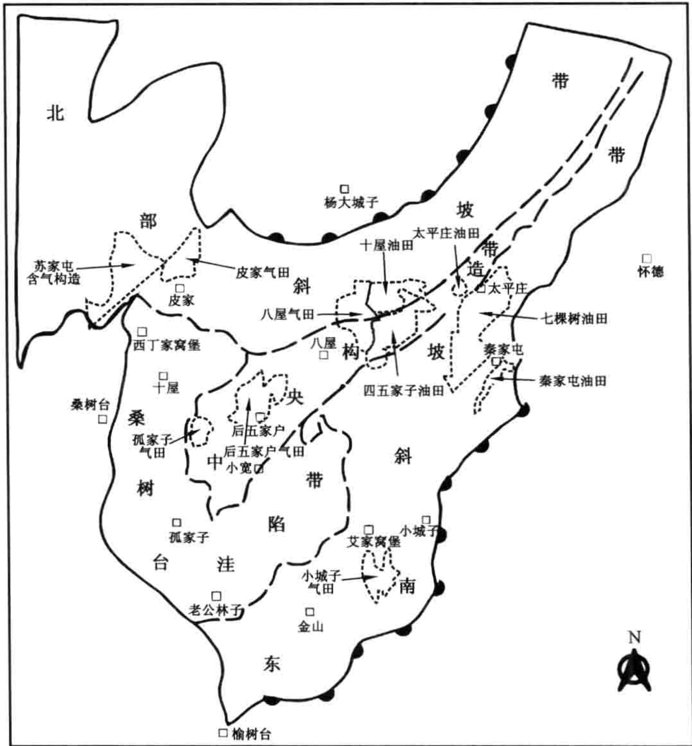


图1-5　梨树断陷油气田分布图

第二节　沉积与地层特征

梨树断陷沉积相在纵向上表现为多种类型沉积相交互叠置,火石岭组、沙河子组、营城组和登娄库组自下而上主要为冲积扇→扇三角洲→浅湖→扇三角洲→半深湖→扇三角洲→辫状河三角洲→辫状河流→辫状河三角洲沉积(图1-6)。

火石岭组为断陷的初始裂陷期沉积,在控盆断裂——桑树台断裂前发育有水下扇,深入桑树台断裂东部的半深湖中,湖盆向NNE方向变浅。沉积受NE向断裂的控制作用明显,断裂不仅控制了各个次凹的展布,且在断裂附近发育部分半深湖相,如秦家屯断裂、小宽断裂、大榆树断裂和桑北断裂等,在秦家屯、七棵树、东河镇等次凹的斜坡部位,发育有扇三角洲。在火石岭期还间歇发生火山喷发,有火山岩沉积,主要分布在杨大城子附近以及皮家附近。火石岭组厚一般为200~1500m,不整合于盆地基底之上,下部火山岩极为发育,上部具含煤建造。岩性组合为:灰紫色火山岩、火山碎屑岩及深灰色砂、泥岩夹煤。

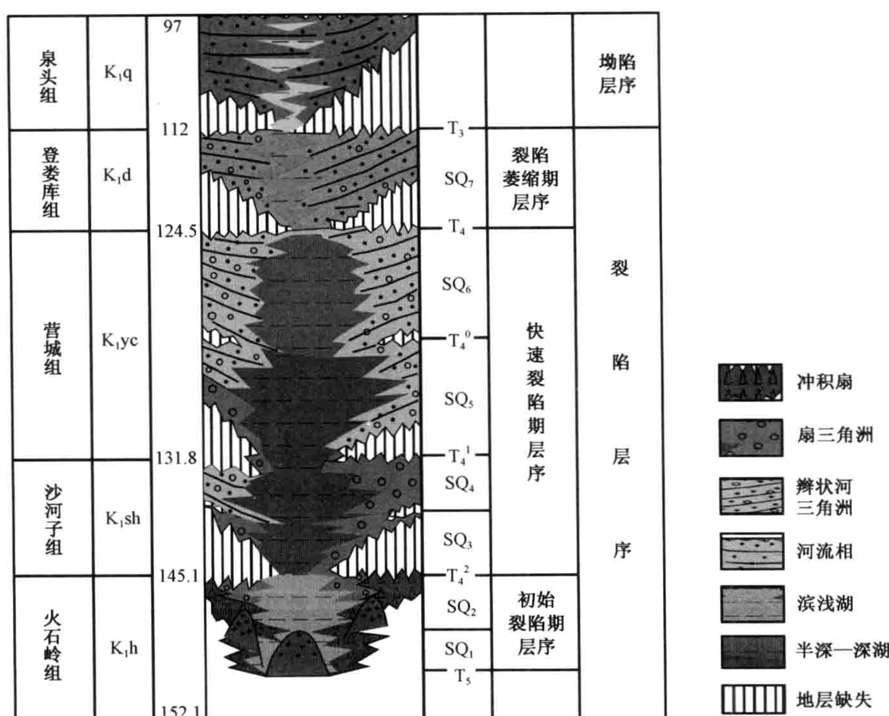


图1-6 梨树地区纵向沉积演化序列模式

沙河子组是断陷发育至鼎盛时期的沉积，盆地快速沉降，地层厚度较大。这一时期主要表现为深湖—半深湖、滨浅湖、扇三角洲及水下扇的沉积组合特征。沙河子组底部主要发育近物源沉积，是一套灰色、褐灰色砂岩、砂砾岩，以粗碎屑占优势的冲积组合，具含煤建造；中部是浅水湖盆及其周缘扇三角洲沉积，沉积了一套含煤的灰色泥岩、粉砂岩及砂砾岩为主的岩石组合；上部以深水和较深水湖及其周缘扇三角洲沉积为主，沉积了一套深灰、灰黑色泥岩和砂砾岩，代表了盆地最大水进期。

营城组总体沉积特征继承了沙河子组的沉积特征。营城组主要发育深湖—半深湖、滨浅湖、水下扇以及扇三角洲的沉积组合特征，扇三角洲主要分布在北部杨大城子斜坡和东南部秦东—小城子斜坡，这一时期的扇三角洲范围更加宽广，但由于受东南部水体面积扩大，和小宽等断裂活动性加强以及同沉积断裂坡折带的控制作用，砂体厚度及扇体范围有所变化，东南部扇三角洲砂体较沙河子组不发育，而北部与东部砂体更为发育且连片分布。同时桑树台断裂附近主要发育深湖—半深湖以及水下扇沉积。岩性主要为浅湖、较深湖为主的灰色、深灰色泥岩、粉砂岩沉积和来自盆地边缘的扇三角洲砂岩与砂砾岩。

登娄库组沉积期是盆地从断陷沉积到凹陷沉积的过渡转换阶段，这个时期的水体范围进一步扩大，水深更浅。断裂对沉积的控制作用减弱，主要沉积由深湖—半深湖转变成以河流作用占主导地位的冲积平原及浅水湖泊为主。岩性主要为以紫、褐黑色泥岩夹粉、中砂岩、粗砂岩与浅灰黑色、黑色泥岩互层为主，有一部分深色泥岩及不同粒级的杂色砂岩、砂砾岩沉积，具有一定生油气性。盆地边缘发育水下扇和三角洲沉积。桑树台断裂附近半深湖范围减小，有水下扇以及三角洲发育；北部斜坡带与东南斜坡带的三角洲前缘扇体连片，砂体范围更加宽广；南部据地震相推测发育三角洲扇体。

总体上来看，梨树断陷在形成初期，西侧发育最大的控盆断裂——桑树台断裂，基底被一

组同生断裂切割，形成几个小型的断陷。随着湖平面的上升，梨树断陷逐渐进入以桑树台断层为主的单断箕状的断陷期。“西断东超、北超”的构造格局控制着统一水体的广盆沉积。在各个断陷靠近断裂一侧，基底强烈下沉，盆地边缘的物源区遭受剥蚀后，经过水流的搬运，沿陡坡快速堆积，形成了水下扇、扇三角洲等粗碎屑沉积物，向断陷中心迅速过渡为半深湖—深湖沉积，并伴有深水浊流沉积。总体表现为，由深湖—半深湖、滨浅湖、扇三角洲、三角洲以及水下扇为主的沉积组合特征。盆地总体上经历了从半深湖盆到深湖，再到半深湖盆，最后为浅湖的充填演化过程。

梨树断陷断陷层位齐全，地层由西向东部斜坡区逐层超覆，向北部斜坡急剧收敛减薄，至杨大城子凸起部位从上到下逐层被剥蚀。晚期在断陷中央发育反转背斜构造，其顶部剥蚀厚度较大，导致坳陷构造层残余厚度向四周增厚。断陷沉降幅度大，断陷构造层最大厚度达8000多米，发育下白垩统火石岭组、沙河子组、营城组和登娄库组等（表1－2）。

表1－2　梨树断陷地层简表

地层系统				地震波组	绝对年龄(Ma)	厚度(m)	岩性简述
系	统	组	段				
第四系						0～130	黄土、灰黄色、暗灰色黏土、杂色砂砾层
白垩系	上统	明水组			1.6	0～500	上部灰、灰黑色泥岩、粉砂岩、砂岩，下部黑色泥岩、灰色粉砂岩、砂岩、砾岩
		四方台组			75	0～420	砾质砂岩、砂岩、泥质粉砂岩、泥岩
		嫩江组	三段		83	100～1500	灰、灰绿、棕红色泥岩、灰色粉砂质泥岩
			二段				深灰色泥岩为主，顶部夹粉砂质泥岩，底为油页岩
			一段				以灰、灰绿色泥岩为主，夹泥质粉砂、粉砂岩
		姚家组		T_1	88.5		灰绿、棕红色粉砂质泥岩，泥质粉砂岩夹粉砂岩
		青山口组		T_1^1	90.4		上部灰绿、紫红色泥岩、砂岩，下部深灰、灰黑色泥岩夹粉砂岩及劣质油页岩
	下统	泉头组	四段	T_2	97	500～1800	紫红、灰绿色泥岩与灰白、灰绿色砂岩
			三段				灰、紫褐、灰褐色泥岩与灰、灰白色粉、细砂岩
			二段	T_2^2			棕褐、紫褐色泥岩与粉、细砂岩不等厚互层
			一段				紫褐色泥岩与粉、细砂岩、中砂岩、含砾中砂岩互层
		登娄库组		T_3	112	100～1500	上部以紫、褐黑色泥岩与粉砂岩、中砂岩、粗砂岩与浅灰黑色、黑色泥岩互层
		营城组	二段	T_4	124.5	200～500	浅灰、灰黑色泥岩、粉砂岩与浅灰、灰绿色粉细砂岩
			一段			200～650	深灰、灰黑色泥岩与浅灰、灰绿色粉细砂岩互层，夹玄武岩、凝灰岩及煤
		沙河子组		T_4^1	131.8	600～1400	上部为深灰、灰黑色泥岩及砂砾，中部为灰色泥岩、粉砂岩及砂砾岩，下部为灰、褐灰色砂岩及砂砾岩
		火石岭组		T_4^2	145.1	200～1500	灰紫色火山岩、火山碎屑岩及深灰色砂、泥岩夹煤
				T_5	152.1	基底	

坳陷构造层较薄，一般在2000m左右，发育下白垩统泉头组、上白垩统青山口组、姚家组、嫩江组，以及第四系，缺失上白垩统四方台组、明水组和古近—新近系。

火石岭组分布于断陷盆地的底部，厚度一般为200～1500m，地层由一套中性、中基性及部分酸性火山岩、火山碎屑岩和深灰、灰黑色泥岩与浅灰色砂岩、砂砾岩互层夹煤构成，代表了冲积—沼泽沉积和火山喷发沉积的共生组合。

沙河子组沉积期是断陷发育的鼎盛时期，盆地的底部主要发育冲积扇和辫状河等近物源沉积，是一套灰色、褐灰色砂岩、砂砾岩，以粗碎屑占优势的冲积组合，具含煤建造；中部是浅水湖盆及其周缘扇三角洲、三角洲沉积组合，沉积了一套含煤的灰色泥岩、粉砂岩及砂砾岩为主的岩石组合；上部以深水和较深水湖及其周缘三角洲、扇三角洲、水下扇组合，沉积了一套深灰、灰黑色泥岩及砂砾岩，代表了盆地最大水进期。沙河子组厚度较大，一般可超过1000m，在断陷的深凹部位，沉积厚度最大可达2500m。

营城组沉积期的水体范围比沙河子期要大，主要发育滨浅湖沉积，盆地边缘分布有湖沼、扇三角洲、水下扇沉积，岩性主要为浅湖、较深湖为主的灰色、深灰色泥岩、粉砂岩沉积和来自盆地边缘的三角洲、扇三角洲砂岩、砂砾岩。该地层在梨树断陷的厚度较大，最大厚度可达2000m。

登娄库组沉积期是盆地从断陷沉积到坳陷沉积的过渡转换阶段，为填平式沉积，这个时期的水体范围进一步扩大，水深更浅，主要以河流作用占主导地位的冲积平原及浅水湖泊相为主，盆地边缘发育扇三角洲、水下扇或冲积扇，岩性主要为以紫、褐黑色泥岩夹粉砂岩、中砂岩、粗砂岩与浅灰黑色、黑色泥岩互层为主，有一部分深色泥岩及不同粒级的杂色砂岩、砂砾岩沉积，具有一定生油气性。地层厚度为100～2000m。

登娄库组沉积之后，梨树断陷由断陷沉积逐渐超覆在断陷盆地或凸起之上，开始向大型坳陷沉积转变。

第二章　烃源岩特征与评价

多年的勘探实践证实，梨树断陷为松辽盆地南部重要的油气产区，断陷层白垩系烃源岩广泛发育，复杂的地质条件和沉积特征形成了梨树断陷断陷层烃源岩具有多种沉积环境、多套烃源岩层系、多种生油母质等特点❶。本章将从沉积学、有机岩石学以及测井地质学和生物标志化合物的角度讨论梨树断陷烃源岩的空间展布特征，研究不同地区断陷层烃源岩的有机质丰度、类型以及成熟度和热演化，并展示烃源岩可溶有机质地球化学特征，总结梨树断断陷层烃源岩的地球化学特征，并对研究区各层位烃源岩进行综合评价。

第一节　烃源岩展布

烃源岩空间展布与沉积时期水体发育有关，如果沉积时期水体发育规模大，烃源岩大规模发育，就可构成强大的物质基础，可能成为优质烃源岩。梨树断陷以强烈的断陷作用为主，呈不对称箕状型，桑树台断裂一侧沉积厚度大，深水沉积发育，沉积了巨厚的烃源岩层，而缓坡带水体浅则沉积厚度小，烃源岩一般不发育。

根据梨树断陷钻井资料分别统计了沙河子组、营城组和登娄库组的暗色泥岩厚度（表2-1）。在沙河子组沉积期，随着桑树台断裂伸展强度增加，沉降幅度增大，盆地整体范围较火石岭组沉积期有所增大，该时期是梨树断陷发育的鼎盛期，湖盆范围变大，水体变深，半深湖—深湖相沉积范围广，为盆地断陷层最大水进期，暗色泥岩沉积较厚，延东、南、北三个方向扩展为滨浅湖相沉积。研究区内不少钻井钻遇该层，沙河子组统计厚度范围为24～524m，平均厚度为212m，其中暗色泥岩厚度范围为4～517m，平均厚度为167m，占地层厚度的17.5%～95.5%，平均比例为60.32%（表2-1），但根据梨树断陷的沉降和沉积史可知，断陷中心桑树台洼陷区沙河子组厚度达1800m以上，该区暗色泥岩厚度最大可达900m，自西向东向北，暗色泥岩厚度逐渐减薄，即由桑树台洼陷900m降至后五家户地区300～500m和四五家子地区100～300m，而在断陷东北部的双龙次凹，最大暗色泥岩厚度可达200m以上（图2-1）。

表2-1　梨树断陷暗色泥岩厚度统计表

层位	地层厚度（m）	暗色泥岩厚度（m）	暗地比（%）
K_1sh	24～524/212	4～517/167	17.5～95.5/60.32
K_1yc	44～1662/494.7	50～731/295.3	9.4～94.8/55.64
K_1d	71～1037.5/355	0～502/157	0～99.3/41.62

注：71～1037.5/355表示最小值～最大值/平均值。

营城组沉积期，伴随着桑树台控盆断裂不断沉降，沉积范围继续扩大，该时期梨树断陷半深湖—深湖相广泛发育，向东南和北部持续发育滨浅湖相沉积。地层厚度介于44～1662m之间，暗色泥岩累计厚度范围达50～731m，占地层厚度的9.4%～94.8%（表2-1）。孤家子和后五家户之间的区域暗色泥岩较厚，孤家子一带最厚，达731m。自西向东部缓坡区，由孤家子—后五家户—四五家子—太平庄地区，暗色泥岩厚度逐渐减小，断陷边缘暗色泥岩厚度较薄，小于100m，双龙次凹暗色泥岩厚度最大处可达200m以上（图2-2）。

---

❶ 卜翠萍．2007．松辽盆地南部十屋断陷油气成藏规律研究．北京：中国地质大学．博士学位论文

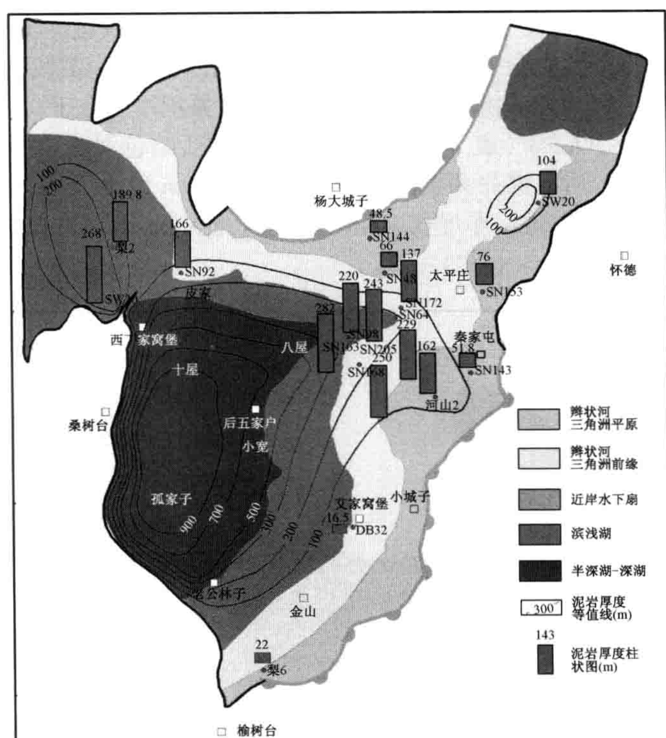


图2－1　梨树断陷沙河子组暗色泥岩厚度等值线图

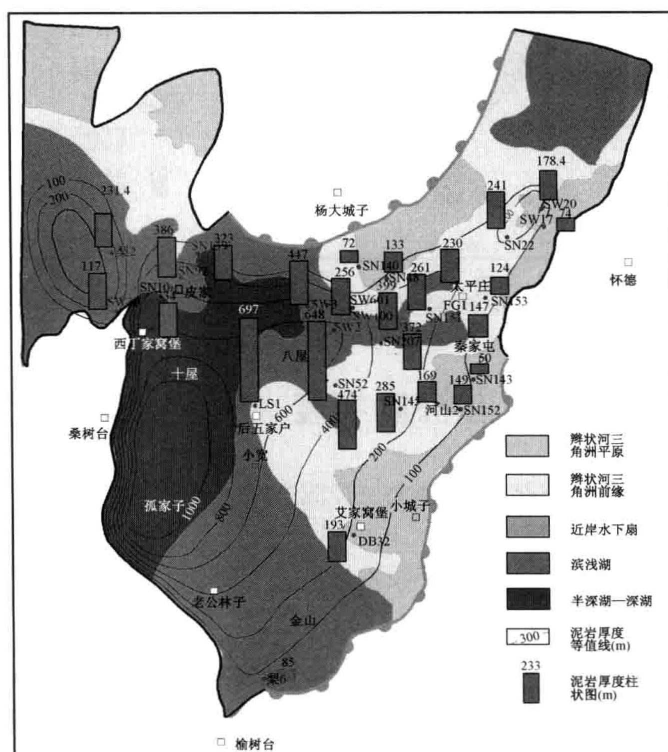


图2－2　梨树断陷营城组暗色泥岩厚度等值线图

登娄库组沉积早期，湖盆处于断陷萎缩期，沉降缓慢，水体范围进一步扩大，整体表现为浅水环境。湖泊主体紧靠桑树台断裂附近，南部水体覆盖范围更大，为滨浅湖亚相环境。登娄库组厚度范围为 71 ~ 1037.5m，平均厚度为 355m，暗色泥岩累积厚度介于 0 ~ 502m 之间，平均为 157m，占地层厚度的 0 ~ 99.3%（表 2 - 1）。受沉积相控制，暗色泥岩较厚区域主要分布在桑树台洼陷的十屋、孤家子、后五家户和金山一带，厚度达 500m 以上。暗色泥岩厚度由南西向北东方向逐渐变薄，至秦家屯地区厚度仅 100m；东北双龙次凹 SN22 井暗色泥岩厚度达 300m 以上，向周围逐渐减小至 100m。（图 2 - 3）。

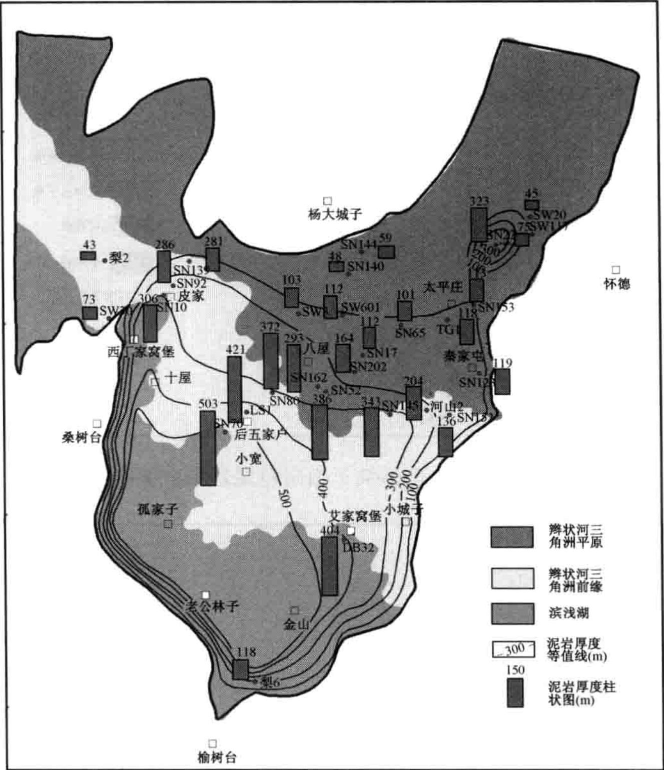


图 2 - 3 梨树断陷登娄库组暗色泥岩厚度等值线图

第二节 有机质丰度、类型与成熟度

受区域构造运动和沉积演化影响，断陷层烃源岩有机质丰度、类型和成熟度等存在明显差异，本节将分别从研究区不同层位烃源岩有机碳含量、母质类型和热演化特征等方面进行分析，以明确断陷层不同层位烃源岩的生烃贡献大小。

一、有机质丰度

有机质丰度是评价烃源岩的指标之一，也是决定烃源岩生烃潜力的最重要因素之一，与沉积环境和沉积相带关系密切。梨树断陷桑树台洼陷带为沉降中心，为有利的生油凹陷，虽然断陷中心仅有少量钻井资料，但根据断陷斜坡带资料类比，断陷中心有机质丰度高，相比而言，斜坡带有机质丰度低于断陷中心。有机碳含量、氯仿沥青“A”及总烃含量和生烃潜量（$S_1 + S_2$）

为有机质丰度评判的四个主要指标，通过对研究区断陷层烃源岩样品实测值分析和烃源岩测井评价发现梨树断陷各层位烃源岩有机质丰度非均质性很强。

(一)不同层位有机质丰度

梨树断陷烃源岩非均质性很强，不同层位烃源岩有机质丰度差别比较明显。图 2－4 展示了梨树断陷泥岩有机碳含量(TOC)的分布，明显可以看出，登娄库组 58% 样品 TOC 位于小于 0.4% 区间，然而其 TOC 大于 0.4% 的烃源岩样品平均值较高，为 1.38%(表 2－2)，反映出在断陷部分地区登娄库组烃源岩具有较高的有机质丰度；营城组 57% 以上的样品 TOC 大于 0.4%，TOC 大于 0.4% 的烃源岩 TOC 平均值为 1.12%(表 2－2)；而沙河子组 82% 以上的样品 TOC 大于 0.4%，烃源岩 TOC 平均值为 1.79%，TOC 大于 1.0% 达到好烃源岩标准的样品比例高达 44%(图 2－4)。火石岭组样品数较少，除北部斜坡的 SN48 井的泥岩样品 TOC 大于 2.0%，其余大部分样品 TOC 均低于 0.4%。

表 2－2　梨树断陷与主要构造带泥岩有机质丰度统计表

地区	层位	地层 TOC(%)		烃源岩 TOC >0.4%		生烃潜量 S_1+S_2(mg/g)			氯仿沥青“A”(%)		
		样品数	分布范围	样品数	平均值	样品数	分布范围	平均值	样品数	分布范围	平均值
梨树断陷	K_1d	156	0.003～5.50	62	1.38	232	0.01～19.76	1.90	91	0.0005～3.3741	0.1058
	K_1yc	658	0.02～12.01	394	1.12	525	0.01～33.37	1.28	212	0.0001～2.3220	0.0963
	K_1sh	191	0.08～7.42	158	1.79	114	0.03～18.03	1.25	62	0.0018～2.9920	0.1124
	K_1h	9	0.05～3.90	3	3.13	2	0.07～0.12	0.10	1	0.0320	0.0320
北部斜坡带	K_1d	30	0.05～1.42	14	0.54	4	0.04～3.91	1.07	28	0.0026～0.1420	0.0132
	K_1yc	134	0.02～2.13	91	0.73	40	0.03～9.08	0.37	13	0.0014～1.1552	0.1259
	K_1sh	18	0.08～1.36	9	0.82	4	0.06～0.14	0.09	2	0.0310～0.0590	0.0450
	K_1h	3	2.05～3.90	3	3.13						
中央构造带	K_1d	71	0.05～4.76	19	0.57	181	0.053～19.7643	2.28	35	0.0021～3.3741	0.2060
	K_1yc	419	0.04～5.54	229	0.91	401	0.0012～33.37	1.15	128	0.0001～2.3220	0.0879
	K_1sh	94	0.15～8.20	82	1.63	69	0.03～15.21	1.15	47	0.0030～2.9920	0.1124
	K_1h	6	0.05～0.19			2	0.07～0.12	0.10	1	0.0320	0.0320
东南斜坡带	K_1d	47	0.003～4.76	21	1.46	39	0.012～5.763	0.55	19	0.0005～0.5269	0.0984
	K_1yc	105	0.03～12.01	74	2.28	84	0.01～20.11	2.30	71	0.0008～1.1510	0.1061
	K_1sh	79	0.09～7.42	67	2.13	41	0.03～18.03	1.54	13	0.0018～0.4760	0.1228
桑树台洼陷带	K_1d	8	3.80～5.50	8	4.58	8	0.10～0.20	0.16	9	0.0078～0.4400	0.0200

对于氯仿沥青“A”含量而言(图 2－5)，分布规律与 TOC 类似，沙河子组烃源岩表现出较高的氯仿沥青“A”含量，大于 0.015% 的样品比例也达到了 60% 以上，大于 0.1% 的样品比例高达 26%，营城组和登娄库组烃源岩氯仿沥青“A”含量次之。

图 2－6 展示了梨树断陷断陷层烃源岩有机碳含量(TOC)和生烃潜量(S_1+S_2)的相关性，从图中还可以看出，不少烃源岩样品位于非烃源岩的区域，同时也有数量可观的样品落入好烃源岩的区域，表明梨树断陷不论是纵向上还是平面上烃源岩有机质丰度的差异性较大。相比较而言，沙河子组烃源岩样品位于烃源岩区域的比例最大。

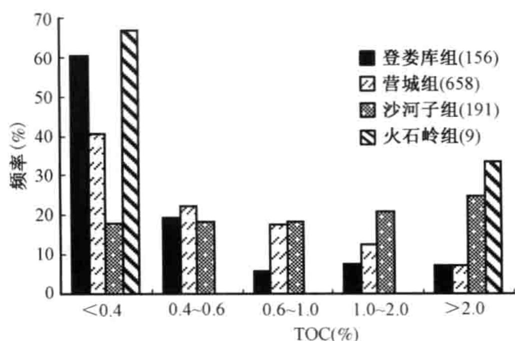


图 2－4　梨树断陷泥岩 TOC 分布图

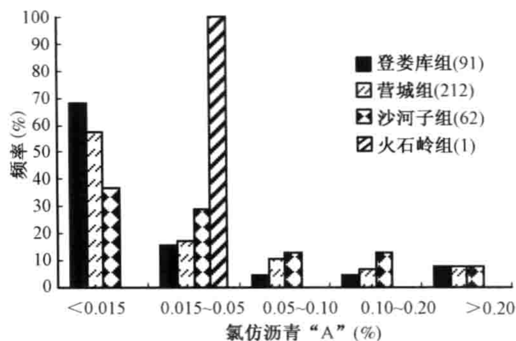


图 2－5　梨树断陷泥岩氯仿沥青“A”含量分布图

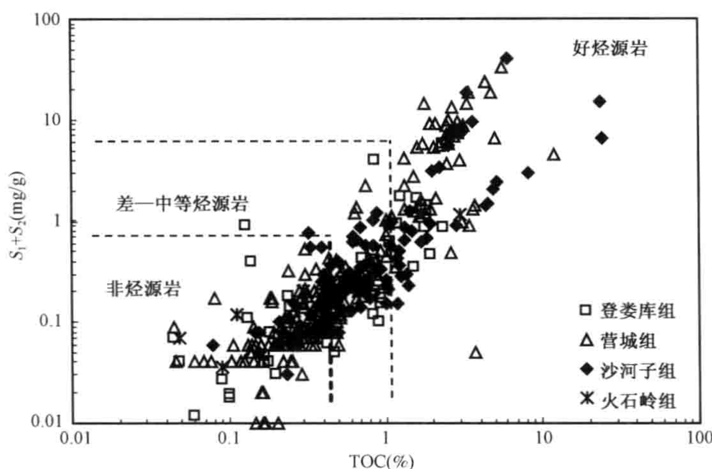


图 2－6　梨树断陷泥岩 TOC 与生烃潜量关系图

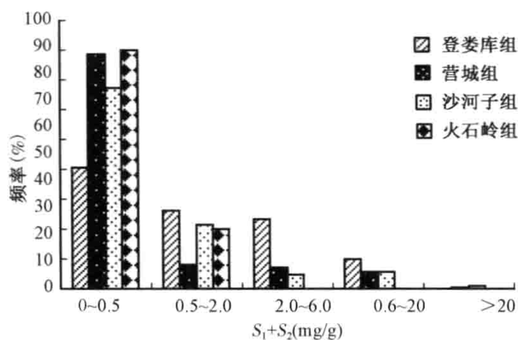


图 2－7　梨树断陷泥岩生烃潜量分布图

生烃潜量(S_1+S_2)也是较好的有机质丰度指标，梨树断陷泥岩的生烃潜量分布如图 2－7 所示。可能由于断陷层烃源岩较高的热演化程度，导致图 2－7 未能较好的反映各烃源层有机质丰度的变化，而沙河子组较高的成熟度使其生烃潜量明显偏低。

整体而言，梨树断陷沙河子组泥岩有机质丰度最高，其次为营城组泥岩，而登娄库组和火石岭组泥岩有机质丰度相对较低。下面就不同层位烃源岩有机质丰度的变化规律进行系统的剖析。

1. 登娄库组

梨树断陷登娄库组泥岩 TOC 分布于 0.003% ～5.50% 之间，平均值高达 1.38%，其中 42% 的样品 TOC >0.4%，达到烃源岩标准。生烃潜量也较高，分布范围为 0.01～19.76mg/g，平均值为 1.92mg/g。氯仿沥青“A”为 0.0005% ～3.3741%，平均值为 0.1058%(表 2－2)。

表2－2中，登娄库组泥岩TOC值大于0.4%的样品虽然在北部斜坡带所占比例最大（图2－8），但其TOC平均值较小，为0.54%，生烃潜量平均值为1.07mg/g；氯仿沥青“A”平均值为0.0132%，整体有机质丰度并不高。中央构造带样品数最多，TOC大于0.4%的样品TOC均值也较低，为0.57%（图2－9），同样生烃潜量均值为2.28mg/g；氯仿沥青“A”平均值为0.2060%，有机质丰度一般。东南斜坡带样品TOC差异较大，但TOC大于0.4%的样品比例较高（图2－10），同时其TOC均值较高，达1.46%；氯仿沥青“A”含量也较高，分布在0.0005%～0.5269%之间，平均值为0.0984%。东南斜坡带的有机质丰度高值区主要位于其南部的金山—小城子地区，尤以DB32井和L6井为典型代表。桑树台洼陷带是登娄库组烃源岩有机质丰度最高的地区，TOC值范围为3.80%～5.50%，均值为4.58%，暗示在洼陷区烃源岩明显变好；较低的S_1+S_2值可能是由于洼陷区较高的热演化程度所致。

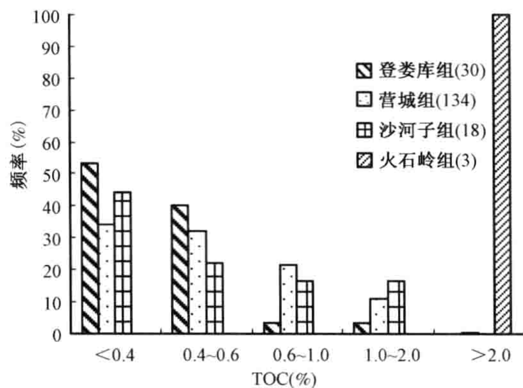


图2－8　梨树断陷北部斜坡带泥岩TOC分布图

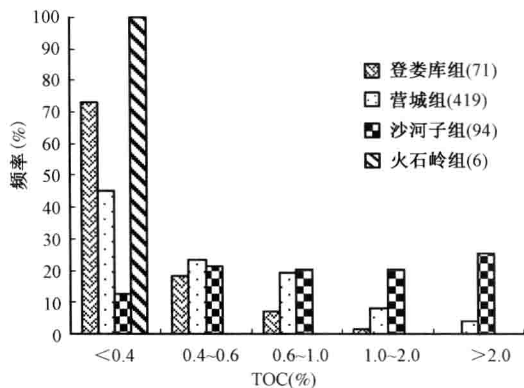


图2－9　梨树断陷中央构造带泥岩TOC分布图

综合来看，登娄库组有机质丰度变化特征与其沉积时期湖盆演化特征是一致的。登娄库组沉积早期，湖盆处于断陷萎缩期，沉降缓慢，整体表现为浅水环境。湖盆主体位于桑树台断裂附近，其南部湖盆较为发育，而断陷北部和东部发育较宽广的辫状河三角洲。因此，登娄库组烃源岩在桑树台洼陷最为发育，从SN76井登娄库组烃源岩样品可见一斑；其次断陷南部金山—小城子一带烃源岩亦较为发育，有机质丰度较高；双龙次凹作为相对独立沉积洼陷，登娄库组下段分布好的烃源岩，而梨树断陷其他地区基本不存在登娄库组烃源岩的分布。

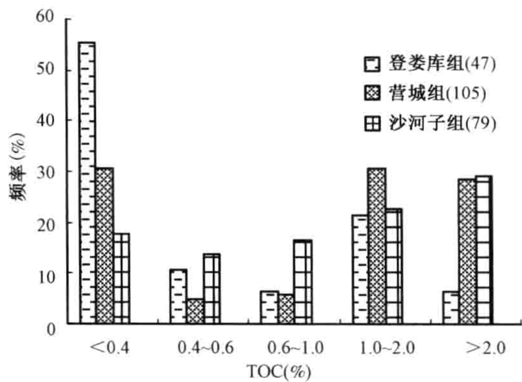


图2－10　梨树断陷东南斜坡带泥岩TOC分布图

2. 营城组

北部斜坡带、中央构造带和东南斜坡带，均有一半数量以上的营城组泥岩样品TOC大于0.4%，约20%的样品TOC大于1.0%，烃源岩TOC平均值达1.12%。生烃潜量分布范围为0.01～33.37mg/g，均值为1.28mg/g。氯仿沥青“A”分布范围为0.0001%～2.3220%，平均值为0.0963%（表2－2）。

北部斜坡带65%的营城组泥岩样品TOC大于0.4%(图2-8),TOC均值为0.73%,氯仿沥青“A”含量分布在0.0014%~1.1552%范围内,平均值为0.1259%(表2-2)。烃源岩的发育受沉积相带控制,北部斜坡带在营城组沉积早中期,苏家屯次洼和SN75—SW3井一线均为半深湖—深湖相和滨浅湖相,仅在皮家北部和太平庄地区为辫状河三角洲沉积,而到了营城组中晚期,湖盆萎缩,北部斜坡带大部分为辫状河三角洲前缘沉积相。该区带营城组烃源岩有机质丰度的高值区主要分布在苏家屯次洼和该区中段SW3井一带,苏家屯次洼样品TOC一般大于0.4%,均值为0.78%。高丰度有机质烃源岩纵向上具有一致的特征,主要集中于营城组下部。

中央构造带营城组泥岩样品分布较广泛,55%的样品TOC大于0.4%(图2-9),烃源岩TOC的平均值为0.91%;S_1+S_2范围是0.0012~33.37mg/g,均值为1.15mg/g;氯仿沥青“A”为0.0001%~2.322%,均值为0.0879%。在平面分布上,中央构造带后五家户地区营城组有机质丰度较高,而八屋地区有机质丰度稍低,有机质丰度呈SW—NE向降低的趋势。营城组沉积期,湖盆水体范围覆盖了中央构造带,后五家户地区处于半深湖—深湖沉积区,八屋地区处于滨浅湖沉积区,基本控制了烃源岩有机质丰度的变化。纵向上来看,营城组烃源岩高丰度层段主要仍集中于下部,尤其后五家户地区的LS1井和八屋SN65井这种特征表现得更为明显。

东南斜坡带营城组泥岩样品TOC值介于0.03%~12.01%之间,70%的样品TOC大于0.4%(图2-10),TOC均值为2.28%;氯仿沥青“A”分布在0.0008%~1.1510%之间,均值为0.1061%;可能受热演化程度影响,生烃潜量较低。该区TOC高值主要位于南部的金山—小城子地区,中部的李家屯和秦家屯地区样品TOC一般低于0.4%,为非烃源岩分布区,东北部双龙次凹有机质丰度也较高。

综上所述,营城组烃源岩有机质丰度高值区主要位于靠近桑树台洼陷的西部地区,北部斜坡区中段SW3井—后五家户—小城子一线以西为梨树断陷营城组烃源岩的主要发育区;双龙次凹存在较好烃源岩分布;八屋地区营城组沉积期处于滨浅湖—三角洲前缘沉积环境,在湖水进退旋回过程中,个别井和层段也可能存在较好烃源岩分布。

3. *沙河子组*

梨树断陷沙河子组泥岩样品有机碳含量分布范围较大,在0.08%~7.42%之间,其中84%以上的泥岩样品TOC大于0.4%,达到烃源岩标准,烃源岩TOC均值为1.79%;44%以上的样品TOC大于1.0%,达到了好烃源岩的标准。生烃潜量分布范围为0.03~18.03mg/g,均值为1.25mg/g,较低的S_1+S_2可能由于沙河子组较高的热演化程度所致。氯仿沥青“A”分布范围为0.0018%~2.9920%,均值为0.1124%(表2-2)。通过断陷TOC和氯仿沥青“A”对比来看,沙河子组烃源岩有机质丰度明显好于登娄库组和营城组。

北部斜坡带沙河子组泥岩样品TOC分布于0.08%~1.36%之间(表2-2),在沙河子组沉积期,苏家屯次洼—皮家地区处于滨浅湖沉积相带,具有良好的烃源岩发育条件,而北部斜坡地区主要为扇三角洲平原沉积区,受沉积相带控制,TOC大于0.4%的泥岩样品主要分布在苏家屯次洼—皮家地区。

中央构造带沙河子组泥岩TOC较高,泥岩样品TOC分布范围是0.15%~8.20%,87%的样品TOC大于0.4%(图2-9),烃源岩TOC均值达1.63%;氯仿沥青“A”含量也较高,分布于0.003%~2.9920%之间,均值为0.1124%。由于沙河子组沉积期是梨树断陷发育的鼎盛

期，半深湖—深湖相沉积范围广，为盆地断陷层最大水进期。由上述分析可知。由中央构造带沙河子组烃源岩广泛发育，特别是后五家户的 LS1 井，八屋的 SN52 井、SW1 井和 SN167 井和太平庄的 SN153 井泥岩，TOC 较高，高值可达 5.55%，显示出沙河子组良好的生烃物质基础。

东南斜坡带泥岩样品 TOC 为 0.09% ~7.42%，其中 67 件样品 TOC 大于 0.4%（图 2－10），均值为 2.13%；氯仿沥青“A”介于 0.0018% ~0.476% 之间，均值为 0.1228%，显示较高的有机质丰度。金山、李家屯和秦家屯地区沙河子组泥岩样品均显示较高的有机质丰度，由此可知，东南斜坡带沙河子组烃源岩分布较为广泛，且发育一定量的好烃源岩。

根据上述分析表明，沙河子组由于沉积时期湖盆水体的扩张，烃源岩广泛发育，不仅烃源岩范围为几套烃源层中最大的，有机质丰度也最高。全盆除北部斜坡 SN75—SW3—SN48 井一线北部缺乏沙河子组烃源岩分布外，其他地区均发育有沙河子组烃源岩，其中苏家屯次洼、八屋、金山、李家屯和秦家屯地区均发育好烃源岩。

（二）不同地区有机质丰度评价

1. 桑树台洼陷

桑树台洼陷在断陷期均处于深湖—半深湖相沉积过程中，为断陷的沉降和沉积中心，发育了较厚的登娄库组、营城组和沙河子组地层。从洼陷带 SN76 井登娄库组烃源岩样品 TOC 和氯仿沥青“A”来看，埋深 1960 ~2294m 的泥岩样品 TOC 介于 3.8% ~5.5% 之间，氯仿沥青“A”为 0.15% ~0.50%，为优质烃源岩。桑树台洼陷深凹区虽然较少井钻遇或钻揭断陷层烃源岩，但通过对 SN76 井的分析可知，深凹区断陷层烃源岩有机质丰度高，可能具有较高的生烃潜量。

2. 北部斜坡带

北部斜坡带主要包含了苏家屯次洼、皮家地区和北部斜坡地区。各地区与代表井地层与烃源岩的 TOC 分布见表 2－3。

表 2－3　梨树断陷北部斜坡带各地区及典型井泥岩 TOC 分布统计表

地区	井号	地层	地层 TOC（%）		烃源岩 TOC >0.4%（%）	
			样品数	分布范围	样品数	平均值
苏家屯		K_1yc	27	0.29 ~1.93	25	0.79
		K_1sh	6	0.41 ~1.36	6	0.86
皮家		K_1d	29	0.05 ~1.42	13	0.51
		K_1yc	13	0.14 ~2.13	8	0.80
		K_1sh	3	0.30 ~1.35	2	0.89
北部斜坡		K_1d	1	0.86	1	0.86
		K_1yc	94	0.02 ~1.78	58	0.70
		K_1sh	9	0.08 ~0.40	1	0.40
		K_1h	3	2.05 ~3.90	3	3.13
苏家屯	SW30	K_1yc	6	0.29 ~0.65	4	0.53
		K_1sh	2	0.41 ~0.64	2	0.53
	L2	K_1yc	21	0.29 ~1.93	18	0.93
		K_1sh	3	0.66 ~1.36	3	1.00

续表

地区	井号	地层	地层 TOC(%)		烃源岩 TOC>0.4%(%)	
			样品数	分布范围	样品数	平均值
皮家	SN75	K_1d	28	0.05~1.42	13	0.51
	SN10	K_1d	1	0.30		
		K_1yc	6	0.18~0.76	5	0.59
		K_1sh	1	0.30		
	SN92	K_1yc	7	0.14~2.13	3	1.15
		K_1sh	1	0.42	1	0.42
北部斜坡	SN140	K_1yc	14	0.02~0.68	3	0.54
		K_1sh	1	0.08		
	SW3	K_1yc	76	0.04~1.78	53	0.72
		K_1sh	1	0.40	1	0.40

1)苏家屯次洼

苏家屯次洼主要泥岩样品位于SW30井和梨2井,主要位于营城组和沙河子组。绝大多数样品TOC均大于0.4%,营城组烃源岩TOC均值为0.78%,沙河子组烃源岩TOC均值为0.88%(表2-3),沙河子组烃源岩有机质丰度稍高于营城组。图2-11a中苏家屯次洼TOC分布直方图也展示了上述特征,沙河子组样品中TOC大于0.6%的中等烃源岩和TOC大于1.0%的好烃源岩比例明显高于营城组,营城组烃源岩TOC大于1.0%的泥岩样品主要位于该组底部层段。该地区代表井L2井的泥岩TOC分布(图2-11b)表现为相同分布特征。由此可以看出,营城组烃源岩以差—中等烃源岩为主,底部发育好烃源岩;而沙河子组以中等—好烃源岩为主,且主要发育在沙河子组的上部。

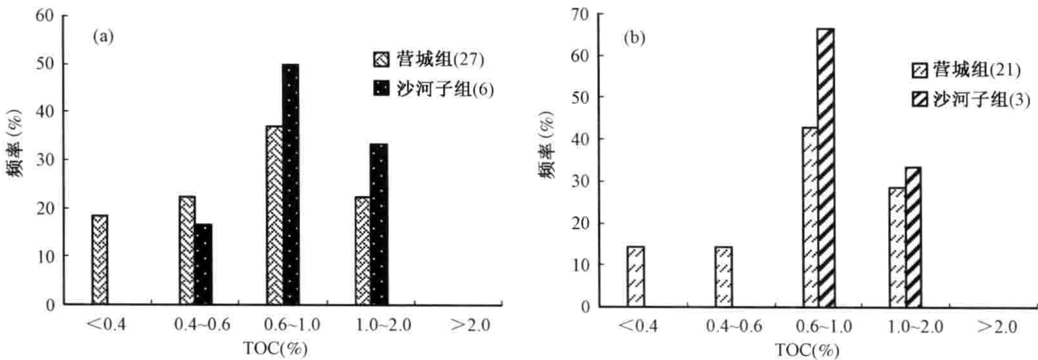


图2-11 梨树断陷苏家屯次洼(a)与L2井(b)泥岩TOC分布图

平面上,L2井营城组和沙河子组烃源岩TOC的分布范围和平均值均明显高于SW30井。L2井烃源岩TOC值揭示出苏家屯次洼在营城组下段和沙河子组上段有机质丰度较高,为中等—好烃源岩。

2)皮家地区

总体而言,皮家地区各烃源层TOC值均不高,TOC小于0.6%的样品占大多数,登娄库组TOC分布于0.05%~1.42%之间,其中部分样品TOC大于0.4%,其平均值也仅为0.51%(表

2-3)。SN75井登娄库组泥岩有机质丰度不高,达到烃源岩标准的样品TOC均值也仅为0.51%,营城组样品TOC分布于0.14%~2.13%之间,其中部分样品TOC大于0.4%,其平均值稍高,为0.80%。通过单井TOC的分布来看,仅SN92井埋深2081.43m处烃源岩TOC为2.13%,其他样品TOC低于0.8%;SN10井营城组烃源岩TOC平均值为0.59%(表2-3)。沙河子组泥岩样品较少,其中部分样品TOC小于0.6%(图2-12)。由此来看,皮家地区各烃源层有机质丰度并不高,生烃潜量有限,这与其长期处于滨浅湖与辫状河三角洲前缘沉积相带有关。

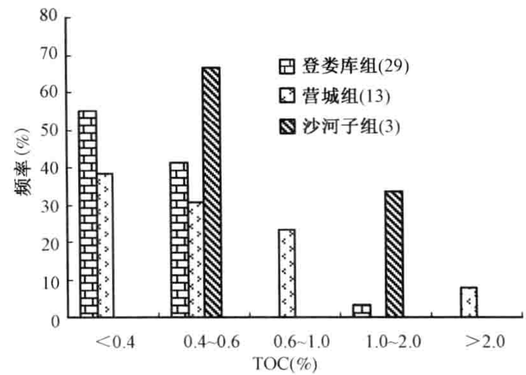


图2-12 梨树断陷皮家地区泥岩TOC分布图

3)北部斜坡

北部斜坡地区整体有机质丰度不高,登娄库组仅SN144井一个泥岩样品,TOC为0.86%;营城组泥岩TOC分布范围为0.02%~1.78%,其中大部分样品TOC大于0.4%(表2-3),部分样品TOC大于0.6%,少量样品TOC大于1.0%。通过单井TOC分布可以看出,营城组烃源岩TOC高值主要集中于SW3井,中等—好烃源岩主要分布于SW3井营城组下段;沙河子组TOC大部分小于0.4%,以非烃源岩为主(表2-3,图2-13);但北部斜坡SN48井1697~1785m井段的火石岭组泥岩TOC大于2.0%,为优质烃源岩(图2-13)。由以上分析可知,北部斜坡地区可能仅在SW3井区附近发育了营城组下段的中等—好烃源岩,且仅SN48井附近部分层段发育了火石岭组优质烃源岩。

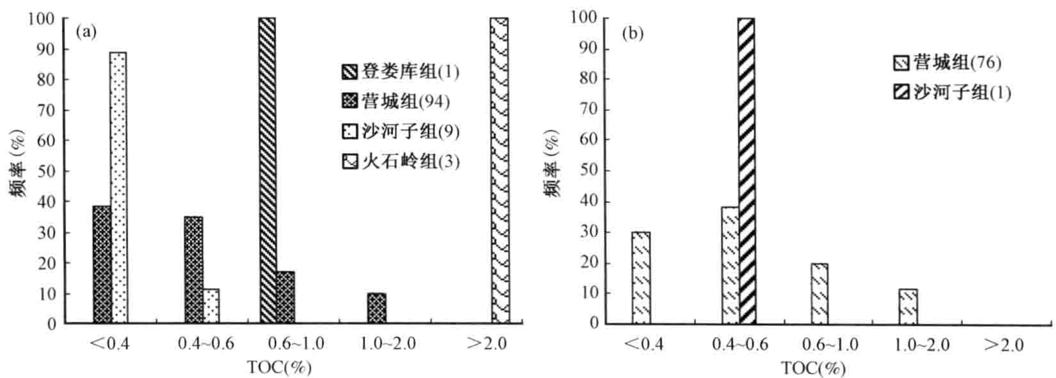


图2-13 梨树断陷北部斜坡地区(a)与SW3井(b)泥岩TOC分布图

3. 中央构造带

中央构造带包括后五家户、八屋、太平庄地区和双龙次凹,沿SW—NE向分布。该区带探井分布密集,各烃源岩层的TOC分布范围如表2-4所示。

1)后五家户地区

后五家户地区靠近桑树台洼陷带,营城组和沙河子组沉积期基本处于半深湖—深湖或滨浅湖沉积相带。后五家户地区主要代表井为LS1、SN79和SN80井,泥岩样品覆盖了沙河子组、营城组和登娄库组。

表 2-4　梨树断陷中央构造带与典型代表井泥岩 TOC 分布统计表

地区	井号	地层	地层 TOC(%)		烃源岩 TOC>0.4%(%)	
			样品数	分布范围	样品	平均值
后五家户		K_1d	28	0.18~0.47	4	0.45
		K_1yc	140	0.09~1.67	100	0.84
		K_1sh	16	0.20~2.24	14	0.80
八屋		K_1d	43	0.05~1.08	15	0.60
		K_1yc	279	0.04~5.54	129	0.96
		K_1sh	78	0.22~8.20	68	1.80
		K_1h	6	0.05~0.19		
后五家户	LS1	K_1d	26	0.19~0.47	3	0.44
		K_1yc	137	0.09~1.67	100	0.84
		K_1sh	16	0.20~2.24	14	0.80
八屋	SN18	K_1d	20	0.09~1.08	5	0.68
		K_1yc	19	0.32~0.85	12	0.59
	SN52	K_1yc	45	0.18~0.84	13	0.57
		K_1sh	12	0.29~1.21	11	0.83
	SN65	K_1yc	50	0.07~4.41	37	1.44
		K_1sh	9	1.82~3.34	9	2.41
		K_1h	4	0.07~0.19		
	SN165	K_1yc	33	0.17~0.86	9	0.50
	SN168	K_1yc	14	0.11~0.60	4	0.50
		K_1sh	14	0.38~0.64	12	0.48

登娄库组 TOC 较低，为 0.18%~0.47%，其中部分泥岩 TOC 大于 0.4%，TOC 均值为 0.45%（表 2-4），该区登娄库组基本为非烃源岩。

营城组泥岩样品 TOC 位于 0.09%~1.67% 之间，其中 71% 的样品 TOC 大于 0.4%，达到烃源岩标准；32% 的样品 TOC 大于 0.6%，为中等烃源岩；19% 的泥岩样品 TOC 大于 1.0%，为好烃源岩（图 2-14）。营城组所有烃源岩样品 TOC 平均值较高，为 0.84%。以上 TOC 分布表明，营城组烃源岩较发育，且一半以上为中等—好烃源岩（图 2-14）。LS1 井单井 TOC 数据也表现出上述特征，绝大多数泥岩 TOC 大于 0.4%，烃源岩 TOC 的平均值为 0.85%（表 2-5，图 2-14），TOC 大于 0.4% 的泥岩样品主要集中于埋深 3600m 以下的营城组下段。

沙河子组 87.5% 的泥岩样品 TOC 大于 0.4%（表 2-4），其中主要以 TOC 位于 0.6%~1.0% 的中等烃源岩为主，占样品总数的 54%，27% 的泥岩 TOC 位于 0.4%~0.6%，而好烃源岩与优质烃源岩仅各占 5%（图 2-14）。由此来看，沙河子组烃源岩在该区存在一定的好—优质烃源岩，可能由于取样和井位局限等原因，并未较好的展示沙河子组烃源岩有机碳含量特征，但从沙河子组沉积期后五家户地区处于半深湖—深湖沉积相带，且根据邻近八屋地区沙河子组烃源岩有机质丰度较高的特征可推断，该区沙河子组烃源岩有机质丰度可能较高。

综合看来，后五家户地区营城组和沙河子组烃源岩 TOC 值均较高，虽仅有的数据表明沙河子组主体为中等—好烃源岩，但推测认为其应为一套好烃源岩。营城组烃源岩主要集中在下段，为中等—好烃源岩。

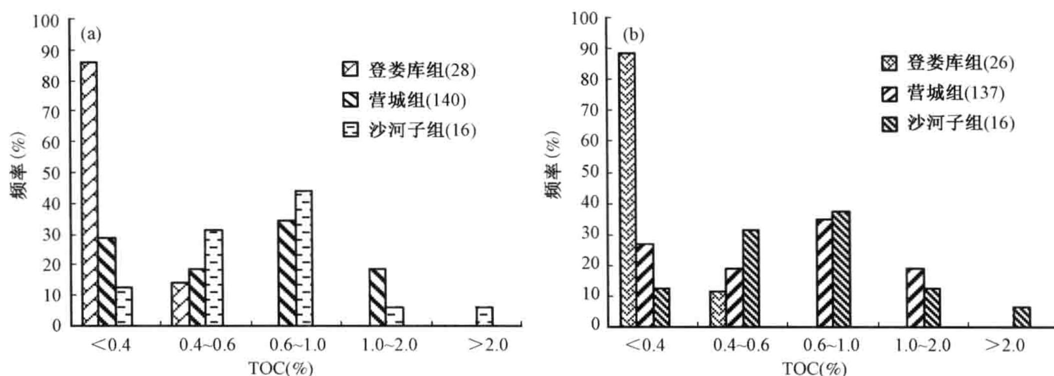


图 2－14　梨树断陷后五家户地区与典型井 LS1 井泥岩 TOC 分布图

2）八屋地区

八屋地区探井较为密集，样品数量多，层位上覆盖了登娄库组、营城组、沙河子组和火石岭组。

登娄库组 TOC 分布于 0.05%～1.08% 之间，其中来源于 SN13 井登娄库组的泥岩 TOC 大于 0.4%（表 2－4）。从图 2－15 也可看出，登娄库组泥岩样品大部分 TOC 值较低，在 TOC 高值区，样品的数量明显减少。营城组样品 TOC 值介于 0.04%～5.54% 之间，其中 46% 的泥岩 TOC 大于 0.4%，烃源岩 TOC 的平均值为 0.96%（表 2－4）。

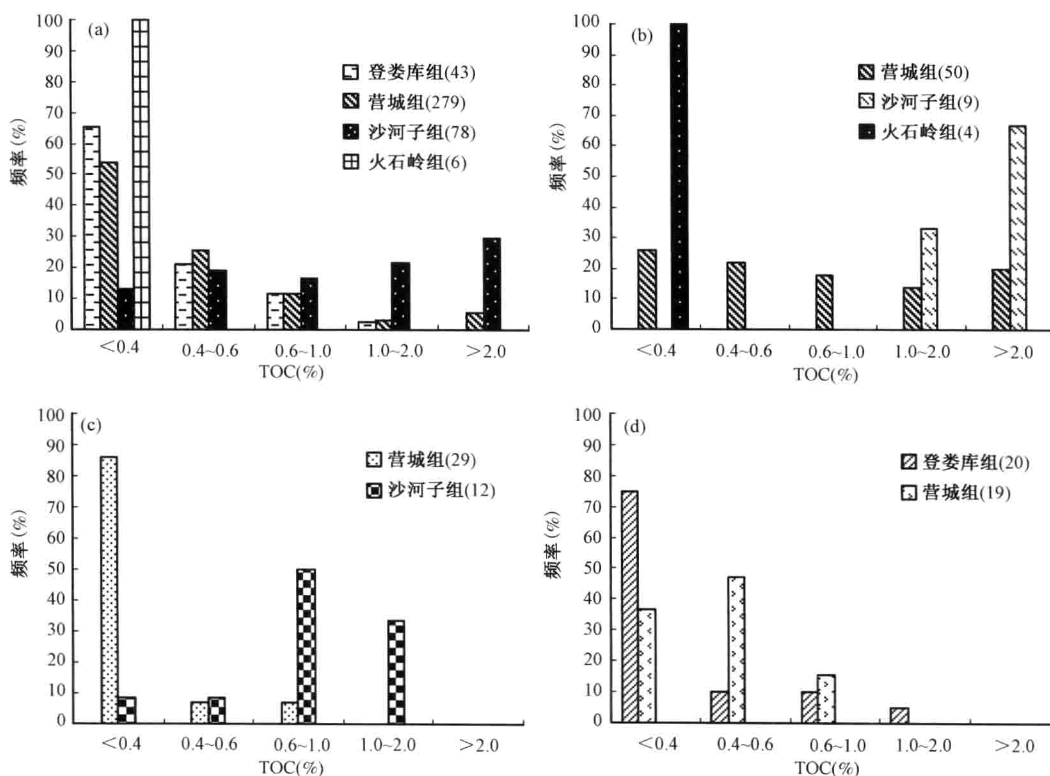


图 2－15　梨树断陷八屋地区（a）与典型井 SW65 井（b）、SNS2 井（C）、SN18 井（d）泥岩 TOC 分布图

营城组样品 TOC 在全区的分布特征与登娄库组类似(图 2-15),样品主体为非—差烃源岩,随着 TOC 含量的增加,样品所占的比例逐渐减小。营城组烃源岩 TOC 大于 1.0% 的样品主要来源于 SN65 井,该井营城组烃源岩 TOC 均值可达 1.44%(表 2-4);而在 SN52 井和 SN18 井中,营城组 TOC 不高。

沙河子组 87% 的样品 TOC 大于 0.4%,烃源岩 TOC 均值高达 1.80%(表 2-4),其中 TOC 大于 1.0% 的好—优质烃源岩比例达到 51%(图 2-15)。就单井烃源岩有机质丰度而言,SN65 井沙河子组泥岩 TOC 均高于 1.0%,其中大部分样品 TOC 大于 2.0%,为好—优质烃源岩(表 2-4);SN52 井沙河子组泥岩 TOC 均大于 0.6%,为中等—好烃源岩。根据上述研究成果,八屋地区沙河子组广泛发育好—中等烃源岩。如从沙河子组沉积期的沉积相分布来看,八屋地区主体为滨浅湖沉积,由此可见,八屋地区向西南方向,靠近洼陷带的区域沙河子组应发育了大范围的好烃源岩。

火石岭组泥岩样品较少且 TOC 均小于 0.4%,为非烃源岩(表 2-4)。

综上所述,八屋地区主要的烃源岩层系为沙河子组,以好—优质烃源岩为主;营城组 TOC 较低,主要为差—非烃源岩,仅 SN65 井有 TOC 大于 1.0% 的烃源岩分布;登娄库组与火石岭组 TOC 较低,主体为非烃源岩。

4. 东南斜坡带

东南斜坡带分布区域较广,由南向北主要包括了金山、小城子、李家屯、秦家屯、太平庄地区和双龙次凹,钻揭层位覆盖登娄库组、营城组和沙河子组,各地区及典型井的地层与烃源岩的 TOC 数据见表 2-5。

表 2-5 梨树断陷东南斜坡带与典型代表井泥岩 TOC 分布统计表

地区	井名	地层	地层 TOC(%)		烃源岩 TOC >0.4%(%)	
			样品数	分布范围	样品数	平均值
金山		K_1d	1	0.06		
		K_1yc	10	0.41~12.01	10	4.76
		K_1sh	10	1.30~7.42	10	3.51
小城子		K_1d	31	0.003~2.39	13	1.11
		K_1yc	12	0.87~2.51	12	1.44
		K_1sh	5	0.09~3.00	3	1.51
李家屯		K_1yc	7	0.20~0.57	1	0.57
		K_1sh	24	0.29~7.14	23	2.25
秦家屯		K_1d	1	0.02		
		K_1yc	14	0.03~0.37		
		K_1sh	22	0.23~5.18	20	1.77
太平庄		K_1sh	18	0.15~5.81	11	1.42
双龙		K_1d	14	0.10~4.76	8	2.02
		K_1yc	62	0.08~10.77	51	2.02
金山	L6	K_1d	1	0.06		
		K_1yc	10	0.41~12.01	10	4.76
		K_1sh	10	1.30~7.42	10	3.51

续表

地区	井名	地层	地层 TOC(%)		烃源岩 TOC>0.4%(%)	
			样品数	分布范围	样品数	平均值
小城子	DB32	K_1d	31	0.003～2.39	13	1.11
		K_1yc	12	0.87～2.51	12	1.44
		K_1sh	5	0.09～3.00	3	1.51
李家屯	HS4	K_1yc	6	0.20～0.38		
		K_1sh	23	0.29～8.66	20	2.51
秦家屯	SN148	K_1yc	1	0.37		
		K_1sh	11	0.40～4.48	11	1.63
	SN145	K_1yc	12	0.03～0.35		
		K_1sh	1	0.33		
太平庄	SN153	K_1sh	17	0.15～1.92	10	0.98
双龙	SN22	K_1d	10	0.16～4.76	7	2.14
		K_1yc	10	0.29～10.77	8	3.61
	SN55	K_1d	4	0.10～1.19	1	1.19
		K_1yc	51	0.08～3.01	42	1.73

1)金山地区

金山地区以L6井为代表,仅在登娄库组底部取到一个泥岩样品,TOC值很低,为0.06%;营城组泥岩TOC分布范围较大,介于0.41%～12.01%之间,其中90%的样品TOC大于2.0%(表2-5),可以看出,营城组尤其是下段泥质烃源岩主要为优质烃源岩(图2-16);沙河子组泥岩样品TOC值范围为1.30%～7.42%,均值为3.51%(表2-5),也为好—优质烃源岩。

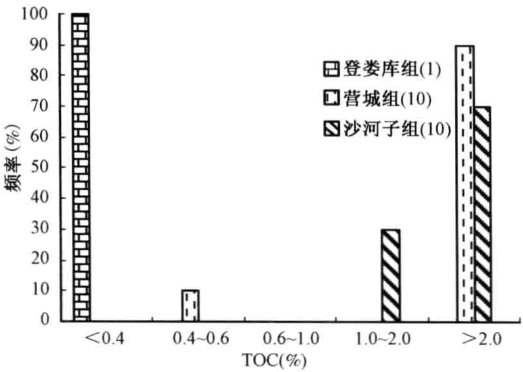


图2-16　梨树断陷金山地区泥岩TOC分布图

2)小城子地区

小城子地区泥岩样品主要来自于DB32井,样品层位覆盖了登娄库组、营城组和沙河子组。登娄库组烃源岩TOC值范围为0.003%～2.39%,其中42%的样品TOC大于0.4%(表2-5),19%的样品TOC大于1.0%,烃源岩TOC平均值为1.11%,由此可见,登娄库组主体为非烃源岩,而差、中等和好烃源岩各占样品总数的15%左右(图2-17);营城组泥岩样品TOC介于0.87%～2.51%之间,均值为1.44%(表2-5),75%的样品为好烃源岩,优质烃源岩占样品总数的17%(图2-17);沙河子组样品TOC分布于0.09%～3.00%之间,其中60%的样品TOC大于0.4%(表2-5),其中40%的样品为中等烃源岩,20%的样品为优质烃源岩。

总体来看,小城子地区营城组烃源岩为好—优质烃源岩,而沙河子组个别层段内可能发育好烃源岩。

3）李家屯地区

李家屯地区 HS2 和 HS4 井泥岩样品位于营城组和沙河子组。营城组泥岩总体 TOC 较低，为 0.20% ~0.57%，仅少数样品 TOC 为 0.57%（表 2－5）；沙河子组泥岩 TOC 范围在 0.29% ~8.66% 之间，其中 87% 的样品 TOC 大于 0.4%，烃源岩 TOC 均值为 2.51%（表 2－5），54% 的样品 TOC 大于 1.0%，达到了好—优质烃源岩标准（图 2－18）。

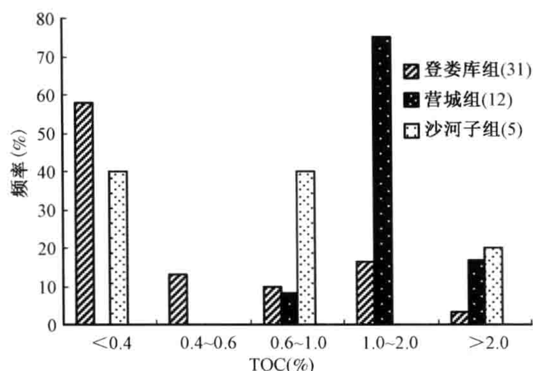


图 2－17 梨树断陷小城子地区泥岩 TOC 分布图

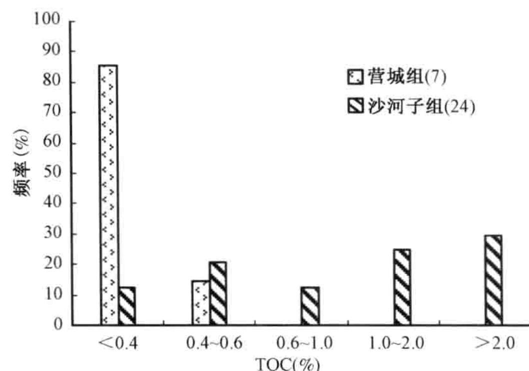


图 2－18 梨树断陷李家屯地区泥岩 TOC 分布图

由上可知，李家屯地区营城组主体为非烃源岩，沙河子组基本为烃源岩，好—优质烃源岩主要位于沙河子组下段。

4）秦家屯地区

秦家屯地区与李家屯地区烃源岩有机质丰度分布特征相似，泥岩样品主要源于 SN148 井和 SN145 井等 7 口井，登娄库组仅 SN142 井有 1 个泥岩样品，TOC 值很低，为 0.02%，为非烃源岩（表 2－5）；营城组泥岩 TOC 值较低，分布在 0.03% ~0.37% 之间，为非烃源岩（表 2－5）；沙河子组泥岩样品 TOC 值较营城组高，TOC 分布在 0.23% ~5.18% 之间；其中 91% 的样品 TOC 大于 0.4%，为烃源岩（表 2－5），27% 的样品 TOC 大于 1.0%，为好烃源岩，优质烃源岩占样品总数的 32%（图 2－19）；所有烃源岩的 TOC 平均值为 1.77%（表 2－5）。从 SN148 井单井烃源岩的 TOC 分布图可以看出（图 2－19），沙河子组泥岩 TOC 均大于 0.4%，其中好—优质烃源岩主要位于沙河子组的下段。

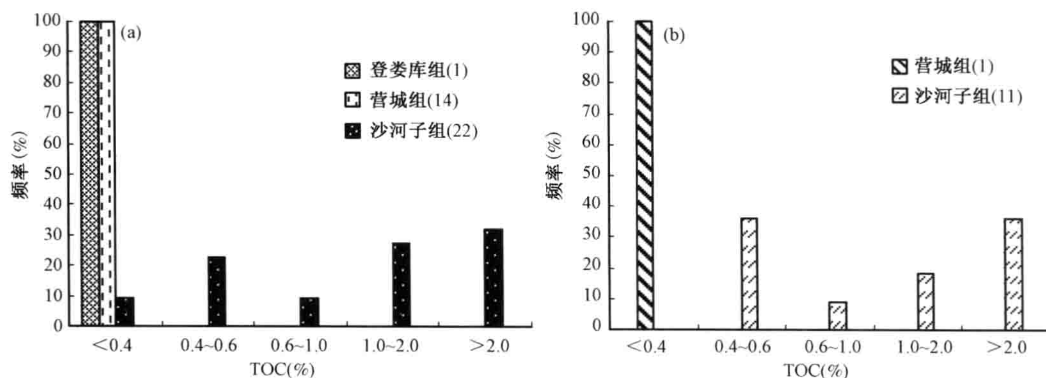


图 2－19 梨树断陷秦家屯地区（a）与 SN148 井（b）泥岩 TOC 分布图

总体而言，秦家屯地区营城组为非烃源岩，沙河子组大部分泥岩为好—优质烃源岩，且主要分布于沙河子组的下段。

5）太平庄地区

太平庄地区以 SW12 井和 SN153 井为代表，仅有沙河子组泥岩样品。沙河子组泥岩样品 TOC 介于 0.15% ~5.54% 之间，其中 61% 的样品 TOC 大于 0.4%（表 2-5，图 2-20），而 SW12 井仅有 1 个样品 TOC 高达 5.81%。由此可知，太平庄地区沙河子组主体为中等—好烃源岩，但 TOC 值低于八屋地区泥岩，这可能主要与沙河子组沉积期湖盆水体覆盖范围有关，八屋地区为滨浅湖沉积相带，在湖水进退旋回中，部分地区或井位还可能处于半深湖—深湖沉积相带；而太平庄地区基本处于辫状河三角洲前缘沉积相带。

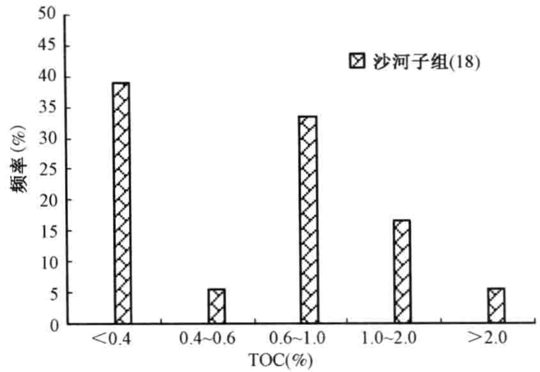


图 2-20　梨树断陷太平庄地区泥岩 TOC 分布图

6）双龙次凹

双龙次凹泥岩样品主要取自登娄库组和营城组，登娄库组烃源岩 TOC 分布于0.10% ~4.76%之间（表 2-5），其中 7% 的泥岩为差烃源岩，36% 的样品 TOC 为 1.0% ~2.0%，为好烃源岩，14% 的样品 TOC 大于 2.0%，为优质烃源岩；烃源岩 TOC 均值为 2.02%，整体上，登娄库组一半以上样品为烃源岩，以好—优质烃源岩为主。营城组泥岩样品 TOC 值分布范围较广，介于 0.08% ~10.77% 之间，其中 82% 的样品 TOC 大于 0.4%，烃源岩 TOC 均值为 2.02%（表 2-5）。营城组烃源岩主要为好—优质烃源岩，分别占样品数的 37% 和 31%（图2-21），SN55 井单井烃源岩地球化学参数也展示了相同的特征，营城组泥岩的主体为好—优质烃源岩（图2-21）。

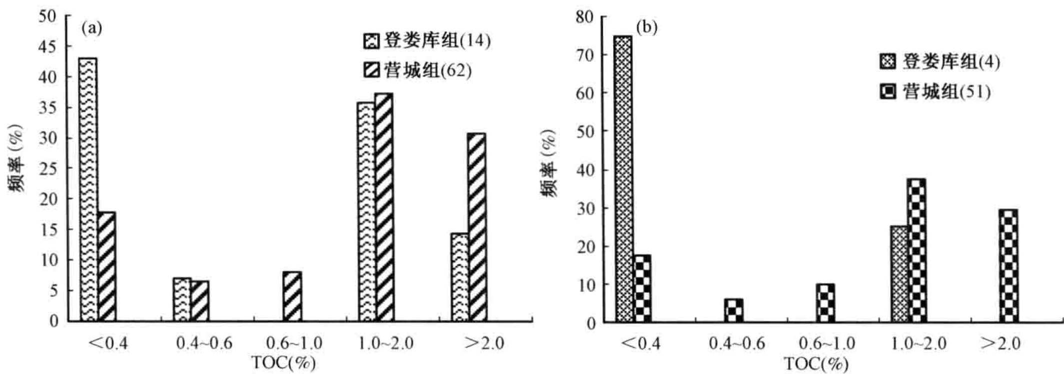


图 2-21　树断陷双龙次凹（a）与代表井 SN55 井（b）泥岩 TOC 分布图

综上所述，双龙次凹登娄库组和营城组均发育有烃源岩，且营城组烃源岩 TOC 值明显高于登娄库组，登娄库组烃源岩主要位于下段，以好烃源岩为主；而营城组大部分层段为烃源岩，以好—优质烃源岩为主。

（三）测井方法评价烃源岩有机质丰度

1. 测井方法评价烃源岩的研究现状

20 世纪 80 年代，就有不同的学者认识到古环境、古气候与沉积速率等因素控制着烃源岩

的形成，由于沉积环境、气候等因素的变化，烃源岩中有机质的分布存在非均质性，而常规地球化学研究中，以有限的离散 TOC 值评价整段烃源岩的生烃潜力可能会出现以偏概全的情况，在全面识别评价烃源岩垂向上的生烃潜力变化特征方面，人们做出了许多尝试，测井技术评价烃源岩较好的克服了烃源岩非均质性的问题，作为地球化学方法的补充研究手段，为烃源岩的评价研究提供更为准确、更为合理的信息。

1979 年埃克森和埃索公司开发了适用于碳酸盐岩和碎屑岩、利用测井资料识别和计算含有机质岩层有机碳的 $\Delta\lg R$ 技术，Schmoker(1981)指出高的自然伽马值与烃源岩间的相关性，1983 年，Schmoker 提出用密度测井信息估算烃源岩的 TOC 值，Meyer 等(1984)提出用电阻率、密度和声波测井组合的方法判别烃源岩，Herron 等(1988)提出用 C/O 中子测井信息计算地层 TOC，Mann 和 Muller(1988)则利用自然伽马能谱、体积密度、声波和电阻率测井组合来评价烃源岩，观察到了以上测井响应参数与烃源岩中 TOC 值和成熟度间的关系。1990 年，Passey 等提出了一项可以用于碳酸盐岩和碎屑岩烃源岩的测井评价方法，能够计算出不同成熟度条件下的 TOC 值。国外在测井评价烃源岩方面已做了不少工作，但国内该研究较缺乏，许晓宏等(1998)结合中国东部断陷盆地的实际地质背景，对方法模型进行了适当的修正，增加了非烃源岩所具有的 TOC 的背景值。

测井信息具有纵向分辨率高的特点，若建立测井曲线与 TOC 之间的定量关系模型，就可得出烃源岩层段 TOC 的连续分布值，无疑克服了地球化学分析取样的随机性和数据的有限性，为非均质烃源岩的识别与评价提供一种较为可靠的方法。鉴于此，笔者建立了梨树断陷营城组与沙河子组烃源岩的测井评价模型，并利用该模型对研究区内重点井营城组和沙河子组的烃源岩进行了纵向上和平面上的 TOC 变化特征研究，为烃源岩的非均质性的客观评价提供了可靠的保证。

2. 烃源岩定性识别方法

进行烃源岩测井评价时，首先必须快速、准确地识别出烃源岩，Flower 等应用感应电阻率曲线叠加在全波声波曲线上的方法快速识别可能的生油岩段，即通过移动电阻率曲线使之与第一剪切波至一致，而不一致层段则可能为烃源岩层段；Meyer 等(1984)提出电阻率、密度和声波测井组合的方法，即利用密度—电阻率交会图或声波时差—电阻率交会图，认为电阻率相对较高和时差相对高或体积密度相对低的数据段为生油岩，反之，可能为有机质贫乏层段，然而由于总有机碳含量与电阻率测井并没有直接可比性，因而该方法具有一定的局限性；张小莉等(1998)采用多测井组合来识别烃源岩，提出暗色泥岩表现为“五高一低”，即高中子、高声波时差、高电阻率、高自然伽马、高铀含量及低密度，并且 TOC 值高的层段自然伽马和铀曲线值相对较高；2001 年，张立鹏等提出了由测井资料导出的 4 个地层组合参数识别烃源岩的方法，但目前还没有利用测井资料来划分和识别烃源岩中有机质的类型的方法。

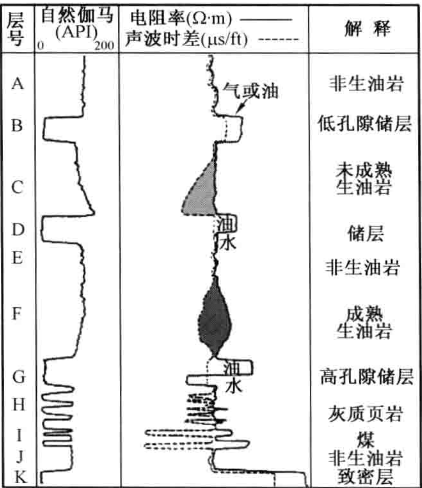


图 2－22　$\Delta\lg R$ 法烃源岩解释示意图

3. 烃源岩测井评价方法在梨树断陷的实际应用

通过模型识别分析，$\Delta\lg R$ 技术在梨树断陷适应性良好且方法简单。$\Delta\lg R$ 法的简要原理见图 2－22，富

含有机质的层段见 F、H、I 和 C 层。未成熟 C 层的 $\Delta\lg R$ 间距由声波时差曲线响应造成；而声波时差和电阻率曲线响应共同造成成熟层 F 的 ΔlgR 间距；碳质页岩层（H 和 I 层）的自然伽马强度低。在煤和碳质页岩沉积的地方，它们可能比其他富含有机质层段更薄，互层性更强；烃类储层的 $\Delta\lg R$ 间距主要因不导电的油或气使电阻率升高造成的。烃类储层的典型响应见 B、D 和 G 层，烃/水接触面通常很明显，如 G 层；因缺乏导电的流体，低孔隙段的电阻率高，如 K 层，这些层段的声波时差相对较低，一般小于 180μs/m（55μs/ft）。一般非生油岩段或非储层段孔隙度和电阻率曲线重叠在一起，即基线，如 A、E 和 J 层。

其具体操作方法如下：首先，统一刻度单位，即将声波时差（-100μs/ft）与两个对数电阻率作为一个刻度比较；其次，确定基线，即将声波时差和电阻率曲线在非生油岩层段的一定范围内完全重叠作为基线；再次，识别烃源层，即在基线的基础上，将上述两条测井曲线明显分开的层段视为生油层，其距离 $\Delta\lg R$ 主要与有机质丰度有关。有必要说明的是，基线的位置需根据具体地质情况不断调整，方能取得很好的效果。此外，为了排除某些含油储层等因素的影响，在上述操作过程中还要注意结合自然伽马测井曲线（有时也可以是自然电位等测井曲线）进行综合分析，最后，根据 $\Delta\lg R$ 值计算 TOC 值。

$\Delta\lg R$ 的计算公式为：

$$\Delta\lg R = \lg(R/R_{基线}) + 0.02(\Delta t - \Delta t_{基线}) \qquad (2-1)$$

式中 $\Delta\lg R$——实测曲线间距在对数电阻率坐标上的读数；

R——测井仪实测电阻率，Ω·m；

Δt——实测声波传播时间，μs/ft；

$R_{基线}$——非生油岩（主要指不含有机质的黏土岩）基线的电阻率；

$\Delta t_{基线}$——通常作为单井基线的标准，通过调整 $R_{基线}$ 使曲线叠合。

选择上述方法还有一个优点，虽然声波曲线和电阻率曲线对孔隙度都有响应，但当孔隙度增加时它们都会发生类似的偏移，因而克服了对孔隙度的依赖性的问题。

在营城组中，SW3 井具有完整的声波测井、电阻率测井、伽马测井和密度测井等资料分析，以及相对应的 TOC 值，因而取 SW3 井建立测井理论模型。首先，根据伽马测井及取心统计表将 SW3 井的岩心样品进行岩性归位；然后根据公式（2-1）计算声波时差曲线和电阻率曲线之间的幅度（$\Delta\lg R$）；再用该幅度差值与岩样化验分析的 TOC 值进行统计（图 2-23），统计关系式如下：

营城组：

$$TOC = 0.894\Delta\lg R - 0.2404 \qquad (2-2)$$

首先利用测井和录井资料识别岩性，扣除火山岩和砂岩，然后利用该组烃源岩测井评价模型，计算梨树断陷各井的 TOC 值，确定有利的烃源岩层段。利用式（2-2）计算 SN18、SN57 井的烃源岩 TOC 值，结果见图 2-24 和图 2-25。由两图可以看出计算的 TOC 值与实测 TOC 值具有较好的一致性，说明该方法在梨树断陷是有效的。

在沙河子组中，SN52 井具有完整的声波测井、实测电阻率测井、伽马测井和密度测井等资料分析，以及相对应的 TOC 值，所以取 SN52 井建立测井理论模型。

首先进行岩心归位，然后选取声波时差和电阻率测井曲线建立模型，再求取 $\Delta\lg R$ 建立基线，最后用该幅度差值与岩样化验分析的 TOC 值进行统计（图 2-26），关系式如下：

沙河子组：

$$TOC = 1.1973\Delta\lg R - 0.1365 \qquad (2-3)$$

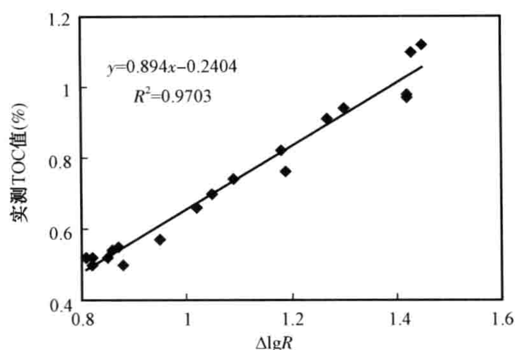


图 2-23　SW3 井营城组烃源岩 ΔlgR—TOC 关系图

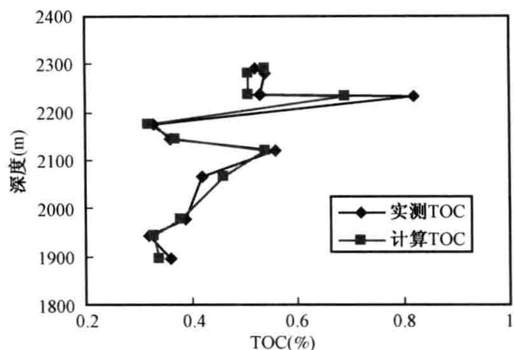


图 2-24　SN18 井营城组烃源岩实测 TOC 值与计算 TOC 值对比图

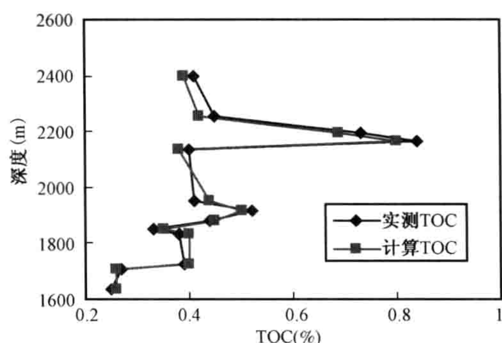


图 2-25　SN57 井营城组烃源岩实测 TOC 值与计算 TOC 值对比图

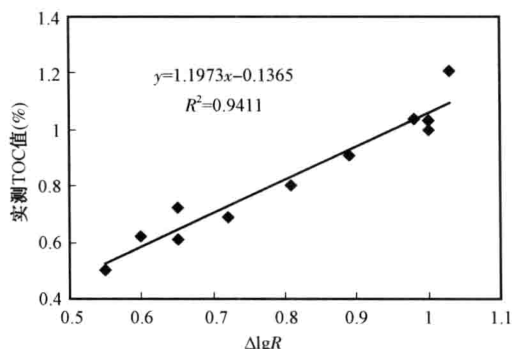


图 2-26　SN52 沙河子组烃源岩烃源岩 ΔlgR—TOC 关系图

利用式(2-3)计算 SN153 井和 SW1 井的烃源岩 TOC 值,计算结果如图 2-27 和图 2-28,可以看出计算的 TOC 值与实测 TOC 值具有较好的一致性。

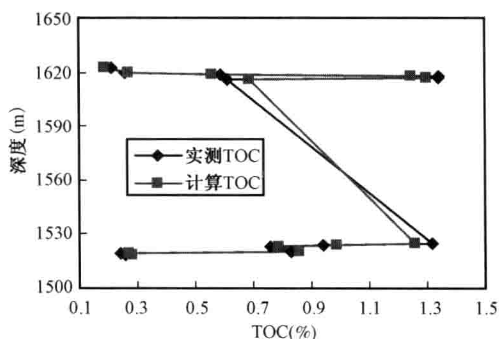


图 2-27　SN153 井沙河子组烃源岩实测 TOC 值和计算 TOC 值比较

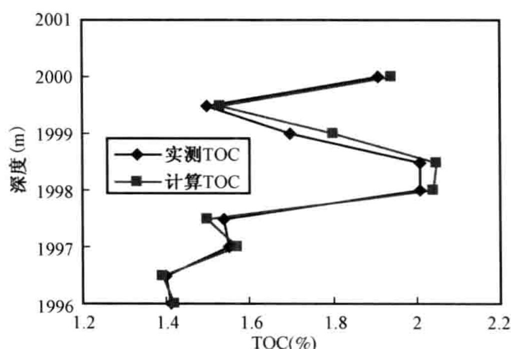


图 2-28　SW1 井沙河子组烃源岩实测 TOC 值与计算 TOC 值对比图

依据上述方法求取的 TOC 值是连续分布的,因而可完整地用于表征整段烃源岩的生烃潜力。如以 TOC 值 0.4% 作为非有效烃源岩的上限,则根据计算结果,大于 0.4% 的 TOC 计算值占整个计算结果的比例为 A,故可求取目的层段(厚 Bm)中有效烃源岩的厚度应为:$B \times A =$

C(m),从而避免了将整段烃源岩全作为有效烃源岩的错误,为有效烃源岩厚度的确定提供了更加可靠的定量换算依据。

从图2-29可以看出,SN52井的TOC非均质很强,在3210~3230m处的TOC值较高,为好烃源岩段,岩性为深灰色泥岩,其对应的电阻率曲线向右(增大)偏移,且声波时差曲线向左(增大)偏移;在3288~3295m处为中等烃源岩段,岩性为浅灰色泥岩,其对应的声波时差曲线向右(减小)偏移,并且电阻率曲线向右(增大)偏移,岩性与TOC对应性好;3200~3300m井段厚度为100m,而有效烃源岩厚度不到100m,通过测井计算的TOC大于0.40%泥岩厚度占75%,因而有效烃源岩的厚度为75m。

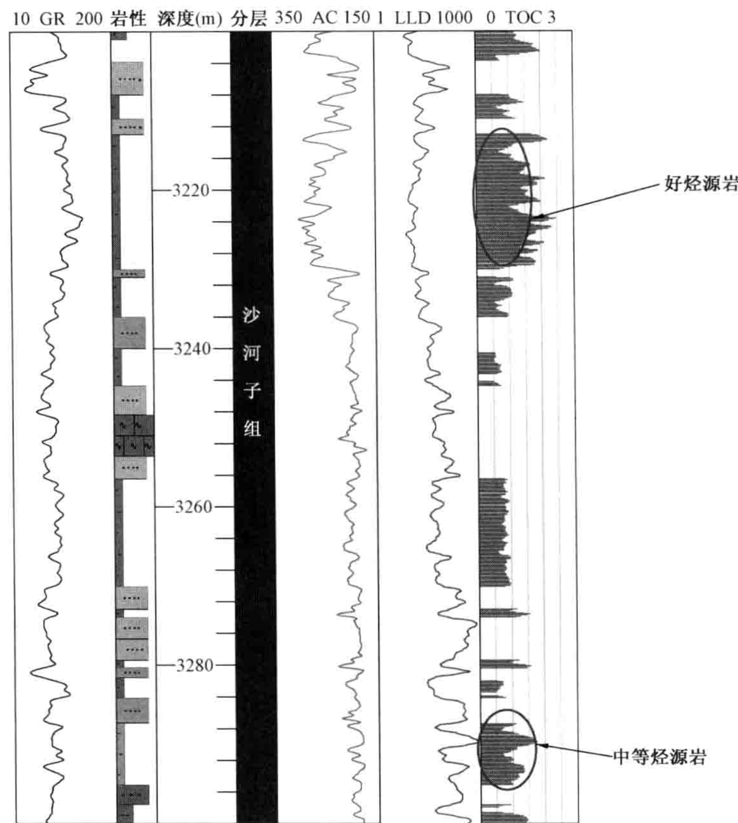


图2-29 SN52井在3200~3300m段烃源岩测井评价

以上分析证明了利用测井资料计算烃源岩TOC值的可行性,计算的TOC值与岩心样品实测TOC值一致性好,且该方法能获取垂向上连续分布的烃源岩TOC值,消除了烃源岩分布的非均质性及有限的岩心样品的随机性等因素所造成的统计误差,从而为正确评价烃源岩提供了可靠基础,也为有效烃源岩厚度的确定提供了合理的定量换算依据。通过上述模型方法,笔者利用梨树断陷55口井的测井资料计算了TOC值,得到的TOC值主要应用于暗色泥岩的厚度计算、TOC平面等值线图的绘制以及单井烃源岩综合地球化学剖面研究之中。

(四)烃源岩有机质丰度综合评价

根据录井资料、地球化学测试分析数据以及测井方法计算的TOC值,分别绘制了梨树断陷登娄库组、营城组和沙河子组泥岩TOC等值线图。

1. 沙河子组

前已述及，沙河子组烃源岩的有机质丰度较其他层位高，为梨树断陷最为重要的一套烃源岩。其中，八屋地区沙河子组烃源岩 TOC 平均值较高，达 1.80%；秦家屯和李家屯地区 TOC 均值分别为 1.77% 和 2.25%；金山和小城子地区也较高，分别为 3.51% 和 1.51%；其他地区除北部斜坡外，TOC 均值较低，基本位于 0.8% ~1.0% 之间。由于桑树台洼陷区缺乏烃源岩样品，无法得出实测数据，但通过沉积相展布推测，通过类比方法可判识其 TOC 高达 3.0% 以上。综合以上地区烃源岩 TOC 分布特征，结合单井实测数据与沉积相的展布，绘制了图 2－30 梨树断陷沙河子组泥岩 TOC 分布等值线图，从图中可以看出，TOC 的高值区分布在桑树台洼陷、八屋地区和秦家屯—李家屯地区，双龙次凹地区的 TOC 较高。TOC 的整体分布由西南向东北区域呈环带状逐渐降低。

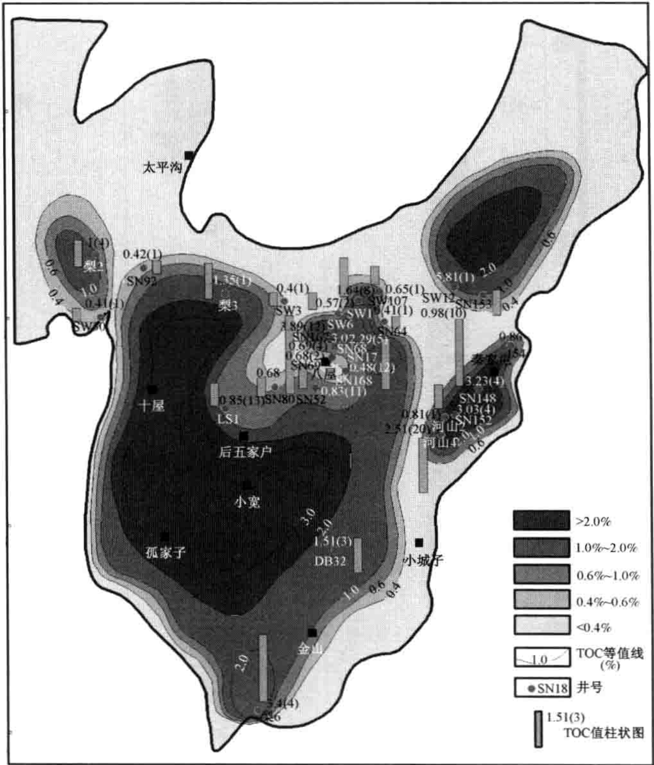


图 2－30　梨树断陷沙河子组泥岩 TOC 等值线图

2. 营城组

由图可知梨树断陷不同地区营城组烃源岩 TOC 值低于沙河子组，仅在双龙次凹 TOC 均值达到 2.02%，金山和小城子地区分别达到 4.76% 和 1.44%，其他地区差异不大，TOC 均值集中在 0.50% ~0.96% 之间，最低的为秦家屯地区，所有样品 TOC 均小于 0.4%，均为非烃源岩。结合沉积相展布和单井实测数据，绘制了图 2－31 梨树断陷营城组泥岩 TOC 等值线图。由图可以看出，TOC 大于 0.4% 的烃源岩分布范围明显小于沙河子组，其中 TOC 大于 3.0% 的区域主要位于孤家子和后五家户之间的区域，TOC 值向北向东方向逐渐减小，太平庄附近小部分区域 TOC 可达 3.0% 以上，双龙次凹地区的 TOC 大于 1.0% 的分布范围较大，而秦家屯地区基本为非烃源岩分布区。

图 2-31　梨树断陷营城组泥岩 TOC 等值线图

3. 登娄库组

梨树断陷不同地区登娄库组烃源岩 TOC 的差异性大，TOC 高值主要分布在桑树台洼陷，均值可达 4.58% 以上，其次为小城子地区和双龙次凹，TOC 均值分别为 1.11% 和 2.02%，其他地区烃源岩 TOC 均值基本位于 0.6% 以下，大多为差—非烃源岩。图 2-32 展示了梨树断陷登娄库组泥岩 TOC 等值线分布，从图可以看出，高值区主要位于桑树台洼陷中心区域，TOC 达 3.0% 以上，其次为双龙次凹，TOC 均值达 2.0% 以上，TOC 值大于 0.4% 的烃源岩分布区也主要位于桑树台洼陷及其邻近地区和双龙次凹，整体分布范围较营城组小。

综合来看，有机质丰度受沉积相带控制，靠近桑树台断裂的一侧，深湖—半深湖相暗色泥岩发育，且有机质丰度高，浅湖相次之，而滨湖—河流相暗色泥岩不发育，有机质丰度低。

二、有机质类型

烃源岩中有机质绝大部分为不溶有机质，主要以颗粒的形式赋存于沉积岩中，在成岩作用和热演化过程中发生各种化学反应，部分转化为液态烃和（或）气态烃。母质不同的烃源岩，在同等演化程度下，其生烃能力可能相差几倍甚至十几倍，或者更大。由此可见，一定数量的有机质（包括烃源岩 TOC 值及烃源岩数量）是成烃的物质基础，而有机质的质量（即母质类型的好坏），则决定着生烃量的大小及生成烃类的性质和组成。本节将主要从干酪根元素、有机岩石学以及生油岩热解等方面研究烃源岩中有机质的类型。

（一）干酪根元素组成

干酪根的有机元素组成能反映有机质的构成与性质，是区分有机质类型的主要指标。

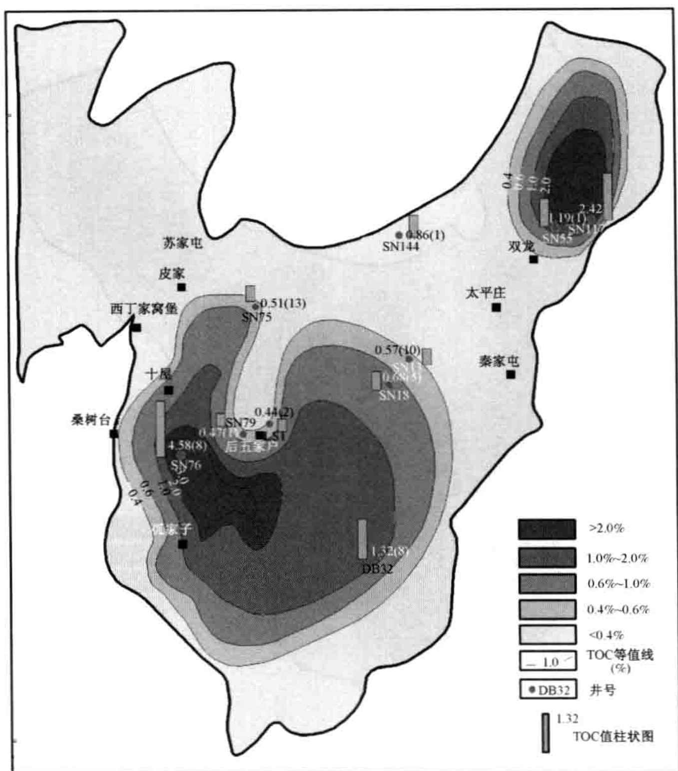


图 2 - 32　梨树断陷登娄库组泥岩 TOC 等值线图

H/C和 O/C 原子比集中反映了干酪根的化学元素组成，利用“范氏图解”可将干酪根划分为三种基本类型(Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ)。黄第藩等(1982)对国内外生油岩样品进行研究后提出干酪根热解分类的 X 图解法，将干酪根划分为三类五型，即 $Ⅰ_1$、$Ⅰ_2$、Ⅱ、$Ⅲ_1$ 和 $Ⅲ_2$；邬立言等(1982)则通过生油岩热模拟所得的降解率、产油潜量、类型指数(S_2/S_3)等参数对有机质进行了类型划分。

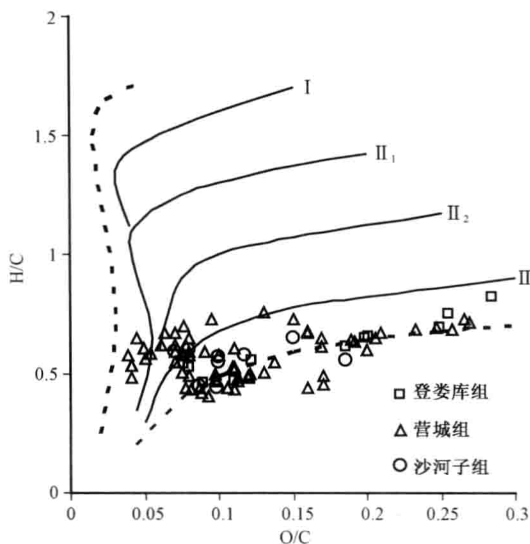


图 2 - 33　梨树断陷烃源岩干酪根元素组成范氏分类图

图 2 - 33 为梨树断陷烃源岩干酪根元素组成范氏分类图，从图中可以看出，登娄库组、营城组和沙河子组样品点分布较为集中，基本位于 $Ⅱ_2$—Ⅲ型区域。

笔者分别统计了梨树断陷北部斜坡带、中央构造带和东南斜坡带典型井的干酪根元素分布。

北部斜坡带苏家屯次洼为该区带较为重要的烃源岩分布区。L2 井为苏家屯次洼的一口代表井，图 2 - 34a 显示 L2 井沙河子组和营城组样品以Ⅲ干酪根为主。

中央构造带后五家户地区发育较好的营

城组和沙河子组烃源岩，以LS1井为例，图2－34b中LS1井沙河子组、营城组和登娄库组样品主要集中在Ⅲ干酪根区域。

金山和小城子地区为东南斜坡带烃源岩最为发育的地区，图2－34c中可以看出，L6井沙河子组、营城组和登娄库组样品也集中于Ⅲ型干酪根区域；图2－34d中DB32井断陷层三个层位烃源岩样品具有较高的O/C比，有机质类型为典型的Ⅲ型干酪根。

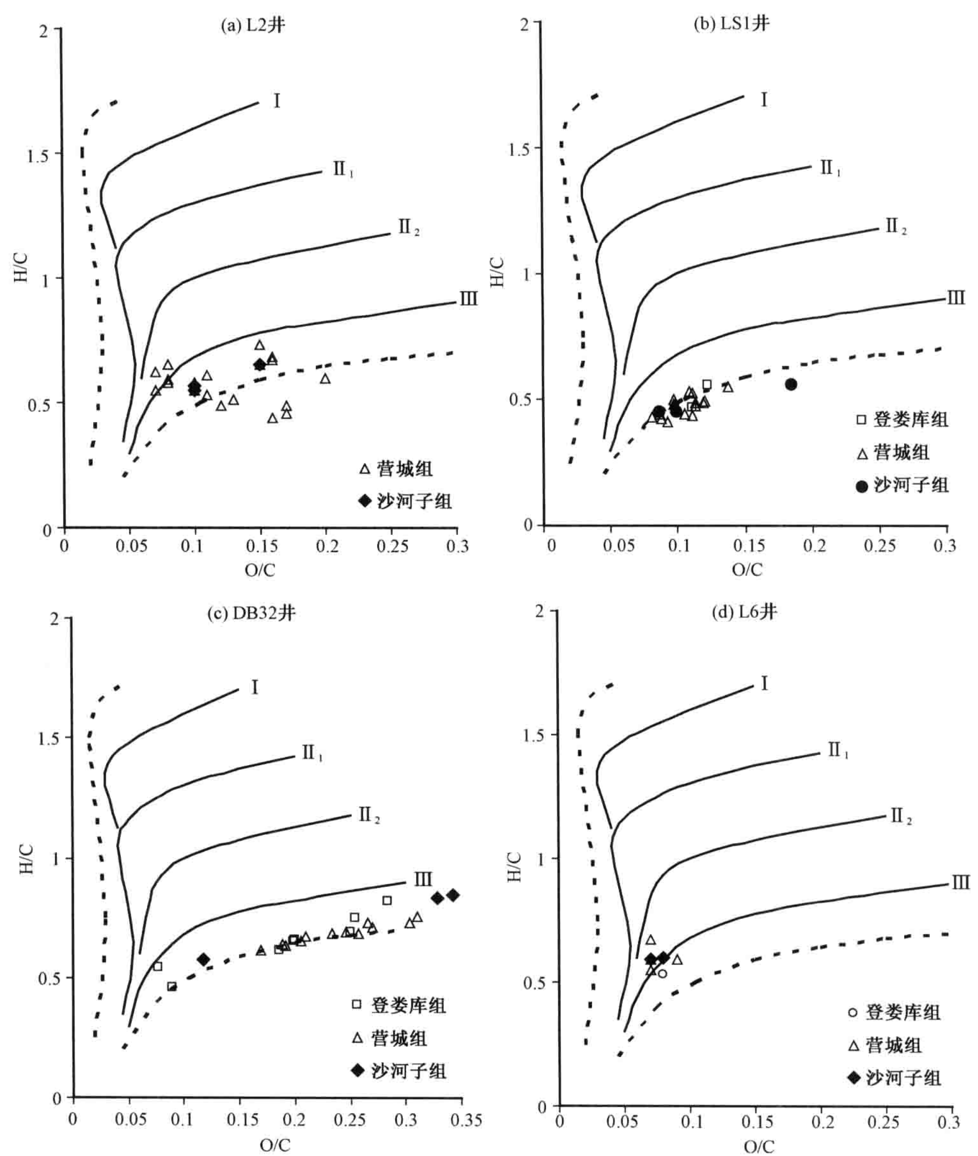


图2－34　梨树断陷不同构造带典型代表井烃源岩干酪根元素组成分类图

（二）显微组成

烃源岩中有机质显微组分的差异性表现在形态、类型、成因以及其光学特征上，具有不同的化学组成及结构的显微组分，其母质类型和生烃潜力也不同。

图2－35较直观地反映了有机显微组分、矿物沥青基质和无机矿物的相对百分含量，总体

而言，断陷烃源岩层绝大多数样品有机显微组分含量相对较低，低于20.0%；少数煤和碳质泥岩样品有机显微组分含量高，可达26.2% ~41.0%。沙河子组、营城组和登娄库组样品均显示出无机矿物含量高，大部分样品的相对含量均大于90%，最高可达99%。

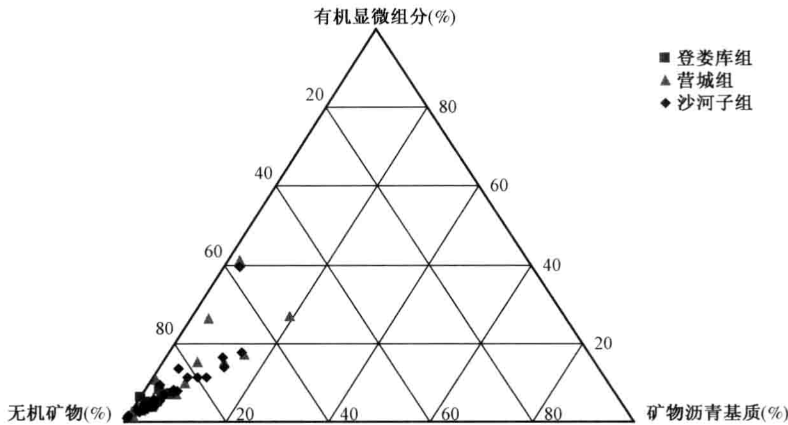


图2-35　梨树断陷烃源岩全岩相对组成三角图

众所周知，干酪根无定形有机物在全岩中主要以矿物沥青基质、沥青质体、无结构藻类体的形式存在，而在全岩分析中占有很大比例的矿物沥青基质本质上是一种有机—无机混合物。矿物沥青基质中存在大量的亚显微级的无定形有机质，其TOC甚至超过形态富氢组分含量，它直接影响有机质类型划分（熊波等，2001）。王铁冠（1992）研究分析，矿物沥青基质往往与低等生源有机质有关，或是与藻类体同源的腐泥型无定形有机质。因此，应将矿物沥青基质中的无定形体纳入有机质类型评价中。由图2-35可以看出，矿物沥青基质含量变化较大，泥岩样品主要分布在0.3% ~15.3%之间，若忽略其生烃特征将导致错误的有机质类型评价。鉴于此，在全岩显微组成中，笔者采用换算公式计算了矿物沥青基质中的无定形有机质归入腐泥组中，以期能更准确地分析梨树断陷烃源岩的有机质类型。

图2-36为研究区泥岩显微组分内组成（包含矿物沥青基质中的无定形有机质）三角图，图中所有样品的惰质组分相对含量均较低，一般不足10%，因此其有机质类型的差异主要体现在富氢的“壳质组+腐泥组”与贫氢的镜质组相对含量的变化上。登娄库组、营城组和沙河子组烃源岩“壳质组+腐泥组”相对含量（平均为31.3%）明显低于镜质组（平均为67.2%），显微组分分布整体偏向镜质组一端，但“壳质组+腐泥组”相对含量（26.0% ~35.5%）和镜质组相对含量(63.5% ~71.9%)差异不明显。这与干酪根元素分析结果较为一致，说明梨树断陷上述三套烃源层有机显微组成主要以镜质组为组，次为“壳质组+腐泥组”，而惰质组含量极低。

图2-36b、c和d分别为梨树断陷不同地区登娄库组、营城组和沙河子组烃源岩全岩有机显微组成三角图，从图中可以看出，不同地区之间同一烃源层有机显微组成具有主体偏向镜质组的分布特征，相对而言，八屋地区营城组和沙河子组少部分样品稍偏向“壳质组+腐泥组”，说明梨树断陷存在一定量有机质类型偏好的烃源岩分布。整体而言，梨树断陷不同地区烃源岩显微组成整体以镜质组为主，有机质类型偏向腐殖型为主。

熊波等（2001）通过全岩各类显微有机组分含量的百分比，并乘以相应的加权系数，求得干酪根的类型指数 *TI* 值。

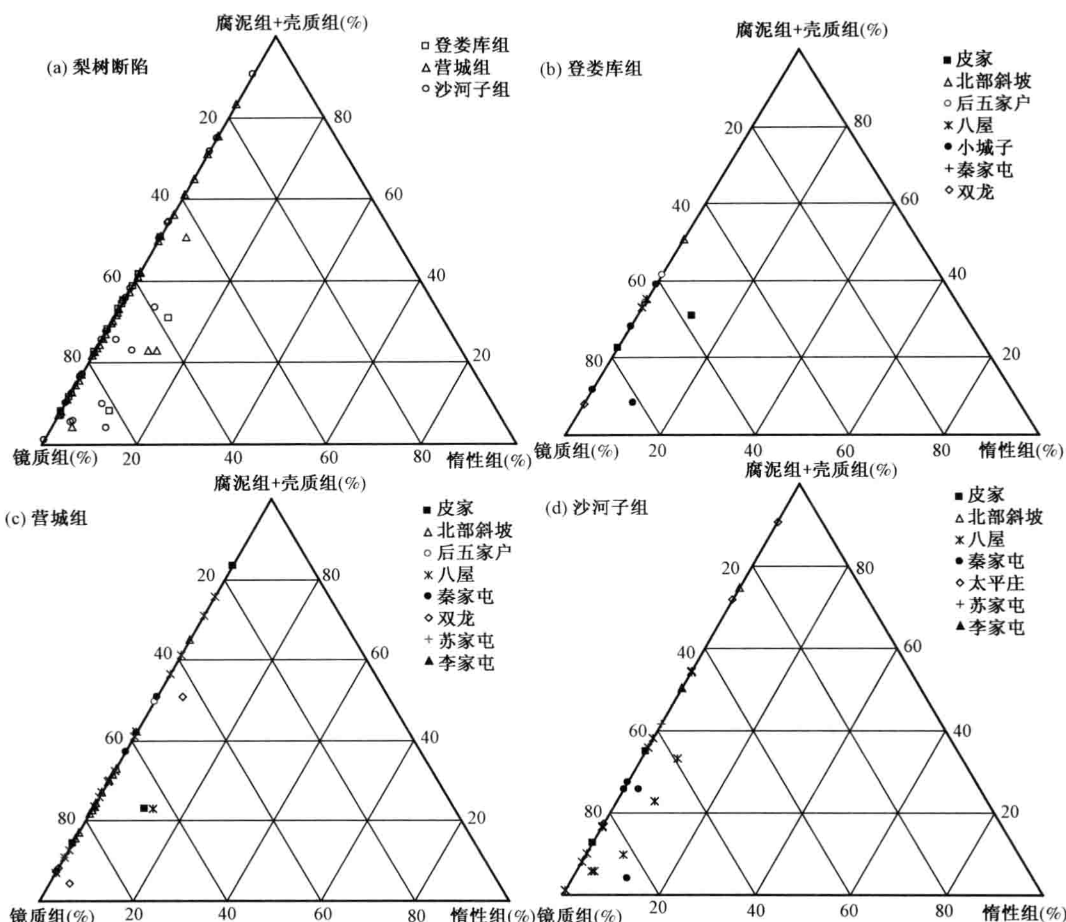


图 2－36　梨树断陷烃源岩全岩显微组成三角图

$$TI = [a \times 100 + b \times 75 + c \times 50 + d \times (-75) + e \times (-100)] \times 100$$

式中，a，b，c，d，e 分别代表矿物沥青基质中隐含的无定形有机质、藻类体、壳质组、镜质组和惰性组的百分含量（有机质体积%）。根据熊波等（2001）的划分方案，梨树断陷大部分样品有机质类型为Ⅲ型，占样品总数的 87.5%；而营城组 SN92 井、SN65 井、SN118 井、SN203 井、SW6 井和 SN140 井以及沙河子组 SN52 井、SN140 井和 SN153 井的少量样品为Ⅱ型有机质，从平面分布看，上述样品主要分布于八屋地区。

（三）岩石热解

烃源岩评价仪（Rock－Eval）是目前国内外广泛应用的评价烃源岩特征的岩石热解仪器，该方法不需要提纯干酪根，能快速且经济地确定烃源岩中有机质的类型。岩石热解参数中氢指数（I_H）、岩石最高热解峰温（T_{max}）、S_1、S_2 等最为可靠，而氧指数（I_O）由于 S_3 峰可能受沉积物样品中碳酸盐的高温裂解所释放的 CO_2 影响，现普遍认为其不可靠。因而一般以 I_H—T_{max} 作图判识有机质类型。Tissot 等（1978）将 $I_H > 600mg/g(HC/C_{org})$ 定为腐泥型（Ⅰ型）干酪根；$100 \sim 600mg/g(HC/C_{org})$ 定为混合型（Ⅱ型）干酪根；$< 100mg/g(HC/C_{org})$ 定为腐殖型（Ⅲ型）干酪根。程克明（1982）结合我国陆相烃源岩过渡型母质占有较大比例的特点，又将 I_H 在

600～350mg/g（HC/C_{org}）划为腐殖—腐泥型（Ⅲ$_1$型）干酪根；350～100mg/g（HC/C_{org}）划为腐泥—腐殖型（Ⅱ$_1$型）干酪根。降解率与烃源岩的有机质类型密切相关，有机质类型越好，C_p越高，降解率也越高，随有机质演化程度的增加，降解率有降低趋势，邬立言等（1988）通过对我国不同沉积盆地大量热解资料的统计，提出了T_{max}—D值划分有机质类型图版。

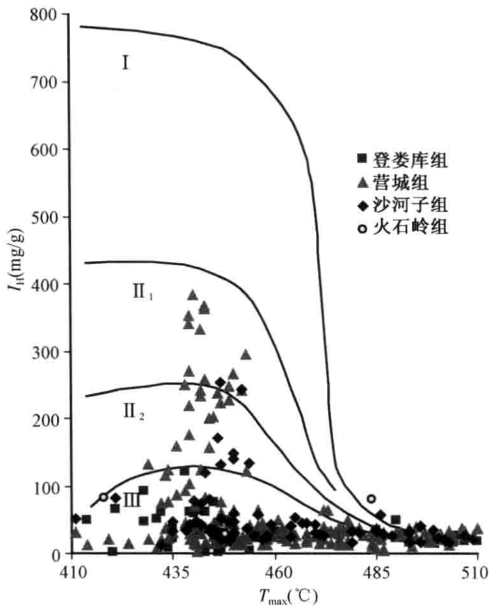


图2－37　梨树断陷烃源岩热解T_{max}与氢指数关系图

图2－37为梨树断陷登娄库组、营城组和沙河子组烃源岩（TOC大于0.4%）热解参数T_{max}与氢指数关系图，可能由于部分样品成熟度较高，在一定程度上影响了HI，使得这些样品不能较好的反映有机质类型，而成熟度适中的样品如登娄库组泥岩样品主要落在Ⅲ型干酪根区域；营城组和沙河子组泥岩样品也以Ⅲ型干酪根为主，仅少数烃源岩样品落在Ⅱ型区，Ⅱ型有机质区分布的样品主要为SN65井、SN118井和SN203井营城组样品与SN153井、SN152井、SN148井和SN17井沙河子组样品，这与全岩显微组成类型指数分布结果较一致。就已有的数据分布来看，Ⅱ型有机质样品主要为八屋地区个别井的层段，在湖盆水体进退旋回过程中，部分层段沉积了较好类型的有机质，这可能与该区井位分布较为密集，样品数量较多有关，因此可以确定，梨树断陷存在一定量的Ⅱ型有机质烃源岩分布区，特别靠近深凹区，但由于这些地区探井和样品数较少，掩盖了Ⅱ型有机质存在的事实。综合来看，梨树断陷不同层位烃源岩主要为Ⅲ型有机质，Ⅱ型有机质也占有一定比例。

三、有机质成熟度与热演化

烃源岩中有机质的丰度和类型为油气生成的物质基础，但只有达到一定的热演化程度有机质才开始大量生烃。笔者将采用镜质组反射率、单井埋藏史与热史盆地模拟和岩石热解峰温T_{max}等来综合分析梨树断陷有机质的热演化程度。

（一）镜质组反射率（R_o）

从图2－38可以看出，研究区内断陷层从沙河子组下部至登娄库组上部烃源岩，所有样品R_o均大于0.5%，主要的烃源岩样品处于生油高峰阶段（R_o为0.7%～1.0%）和高成熟阶段（R_o为1.2%～2.0%），且这种成熟度特征与目前断陷内分布的油气特征较为一致。

图2－39为梨树断陷烃源岩镜质组反射率（R_o）与深度关系图，从图中可以看出，烃源岩中有机质的镜质组反射率与其埋藏深度之间呈现良好的对数关系，所测样品R_o值均大于0.5%，介于0.53%～2.01%之间，处于成熟—高成熟的热演化阶段。

图2－40分别展示了梨树断陷不同地区烃源岩镜质组反射率（R_o）与深度关系，从图中可以看出，不同地区R_o与地层埋深之间关系存在明显的差异。

皮家地区通过仅有样品R_o数据分析可知（图2－40a），登娄库组、营城组和沙河子组烃源岩现今R_o位于0.74%～1.08%之间，处于成熟阶段。根据皮家地区现今R_o与深度的回归公

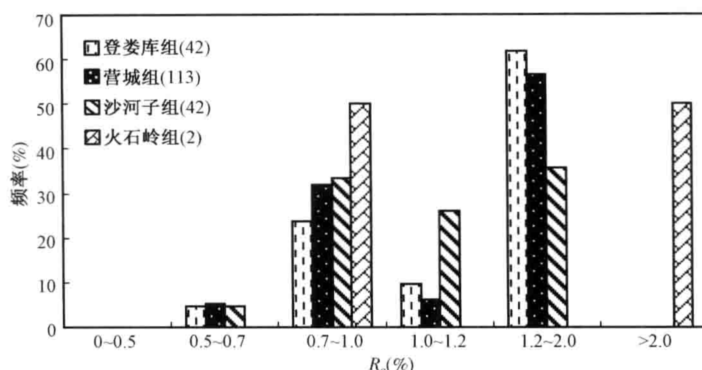


图 2－38　梨树断陷烃源岩 R_o（%）分布范围及频率图

式可以计算，生烃门限（R_o >0.5%）为 799m，生烃高峰位于 1655 ~ 2560m 之间，3026m 以下地层进入了高成熟阶段（R_o >1.2%）（表 2－6）。

图 2－40b 为北部斜坡地区烃源岩 R_o（%）与深度关系图。根据八屋地区现今 R_o 与深度的回归公式可以计算，934m 为生烃门限深度（R_o > 0.5%），生烃高峰区段为 1404 ~ 1903m，2158m 以下地层进入了高成熟阶段（R_o >1.2%）（图 2－40b）。北部斜坡不同井位 R_o 差异较大，位于盆地边缘的 SN140 井、SN144 井和 SN48 井，热演化程度明显较低，营城组和沙河子组基本位于低成熟阶段，而偏南部的 SW3 井和 SW601 井，成熟度较高，基本处于成熟—高成熟阶段，R_o 位于 0.9% ~1.4% 之间。根据北部斜坡地区现今 R_o 与深度的回归公式可以计算，生烃门限（R_o >0.5%）深度为 934m，生烃高峰位于 1404 ~ 1903m 深度段，2158m 以下地层则进入了高成熟阶段（R_o >1.2%）（表 2－6）。

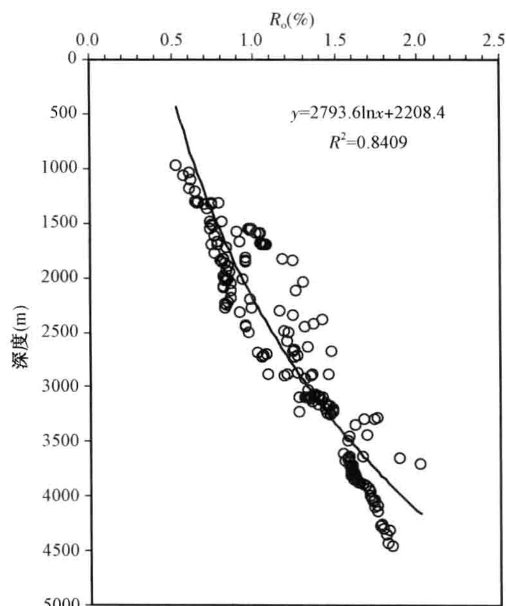


图 2－39　梨树断陷烃源岩镜质组反射率（R_o）与深度关系图

图 2－40c 为后五家户地区烃源岩 R_o（%）与深度关系图，可以看出，烃源岩热演化程度较高，R_o 位于 0.8% ~1.5% 之间。

图 2－40d 为八屋地区烃源岩 R_o（%）与深度关系图，八屋地区登娄库组、营城组和沙河子组烃源岩 R_o 介于 0.65% ~1.70% 之间，大多数样品 R_o 位于 0.7% ~1.2% 之间，现主要处于成熟阶段（图 2－40d）。根据八屋地区现今 R_o 与深度的回归公式可以计算，生烃门限深度为（R_o >0.5%）844m，生烃高峰位于 1400 ~ 1960m 之间，2250m 以下地层进入了高成熟阶段（R_o >1.2%）（表 2－6）。

图 2－40e 为小城子地区烃源岩 R_o（%）与深度关系图，小城子地区烃源岩成熟度较高，现今登娄库组烃源岩已达成熟—高成熟阶段，营城组和沙河子组烃源岩处于高成熟阶段，火石岭组已临近过成熟阶段。根据 R_o 与深度的回归公式可以计算出，现今 R_o >0.5% 即进入生烃门限的深度为 1385m，生烃高峰的深度约在 2000 ~2500m 之间，2854m 以下层段已达高成熟阶段（表 2－6）。

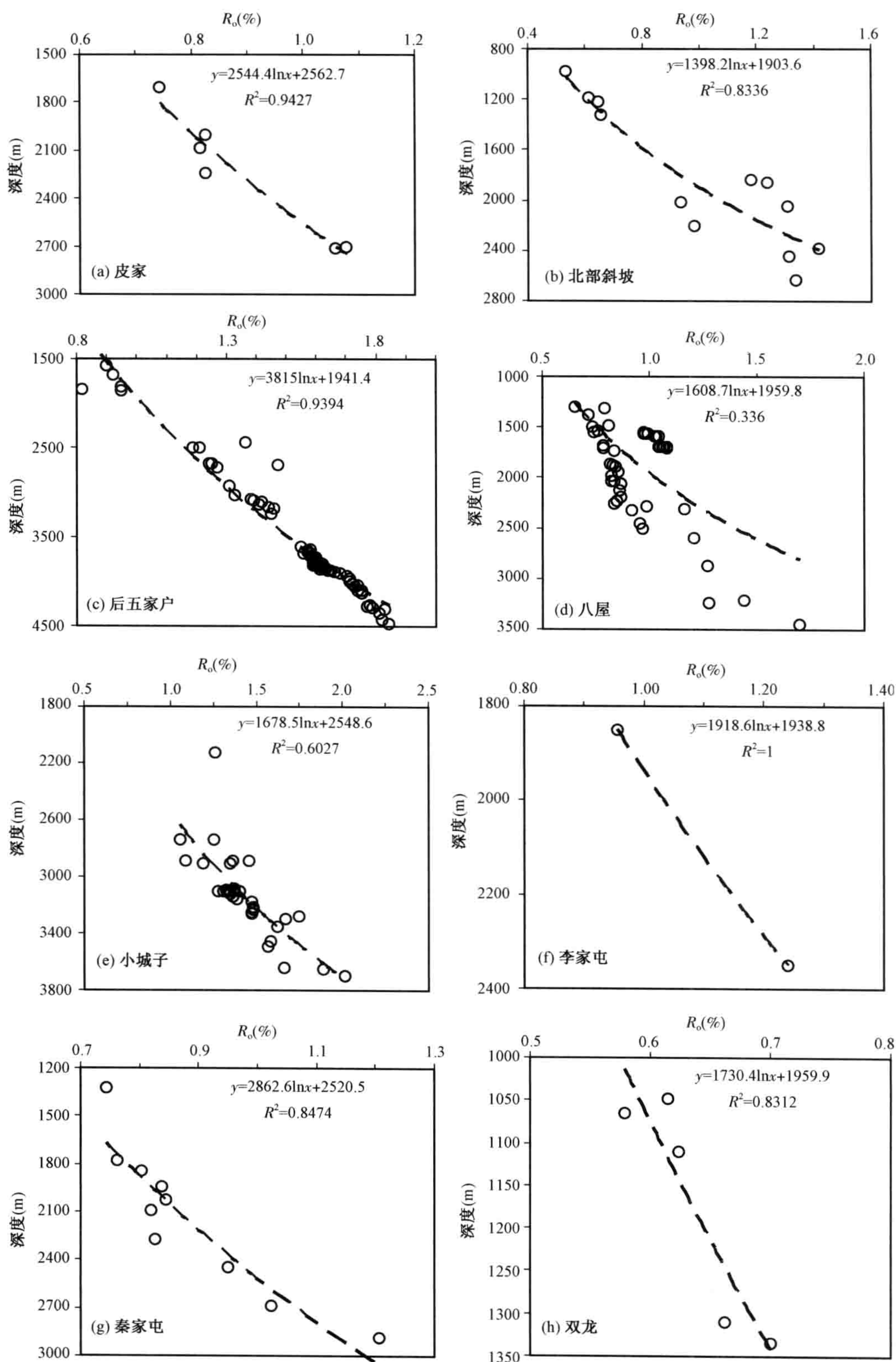


图 2－40　梨树断陷不同地区烃源岩镜质组反射率(R_o)与深度关系图

表 2－6　梨树断陷烃源岩现今镜质组反射率 R_o 对应深度表

R_o(%)	地区					
	八屋(m)	小城子(m)	皮家(m)	双龙(m)	北斜坡(m)	秦家屯(m)
0.5	835	1385	799	760	934	536
0.7	1527	2000	1655	1342	1404	1499
1.0	2259	2500	2560	1959	1903	2520
1.2	2799	2854	3226	2275	2158	3042

李家屯地区样品点较少，如图 2－30f 所示，根据该区现今 R_o 与深度的回归公式可以计算，生烃门限(R_o >0.5%)位于 608m，生烃高峰深度范围是 1254～1938m，2288m 以下地层进入了高成熟阶段(R_o >1.2%)(表 2－6)。

图 2－40g 为秦家屯地区烃源岩 R_o(%)与深度关系图，烃源岩样品 R_o 主要位于 0.74%～0.84%之间。根据秦家屯地区现今 R_o 与深度的回归公式可以计算，生烃门限(R_o >0.5%)为 536m，生烃高峰深度段范围较广，介于 1499～2520m 之间，3042m 以下地层进入了高成熟阶段(R_o >1.2%)(表 2－6)。

图 2－40h 为双龙次凹烃源岩 R_o(%)与深度关系图，双龙次凹烃源岩成熟度较低，所测有限的 R_o 数据显示，登娄库组和营城组烃源岩均处于低成熟阶段。根据双龙次凹现今 R_o 与深度的回归公式可以计算，生烃门限(R_o >0.5%)处于 760m，生烃高峰深度为 1342～1959m，2275m 以下地层进入了高成熟阶段(R_o >1.2%)(表 2－6)。

(二)岩石热解峰温 T_{max}

T_{max}是烃源岩干酪根热解 S_2 峰的最大生烃强度点所对应的温度，由于其易快速测定，常用于判定处于有机质热演化的各个阶段，一般来说，T_{max}小于 430℃为未成熟阶段，当该值大于 500℃时则为过成熟阶段。

梨树断陷下白垩统热解数据中，热解峰温 T_{max}主体大于 430℃，如图 2－41 为梨树断陷下白垩统暗色泥岩 T_{max}与深度关系面。从图中可以看出，T_{max}随着深度的增加而逐渐增大，埋深大于 1000m 的绝大多数样品 T_{max}大于 430℃，表明烃源岩皆已进入生烃门限，主体分布于 430～460℃之间，为成熟阶段，部分样品大于 460℃，达到高成熟度阶段。由图 2－41 可以发现除整体随深度增加 T_{max}逐渐增大的趋势外，部分深度段仍有部分样品 T_{max}低于 430℃，这可能与样品有机质丰度较低有关，但整体上 T_{max}表征的热演化程度与镜质组反射率 R_o 基本一致。

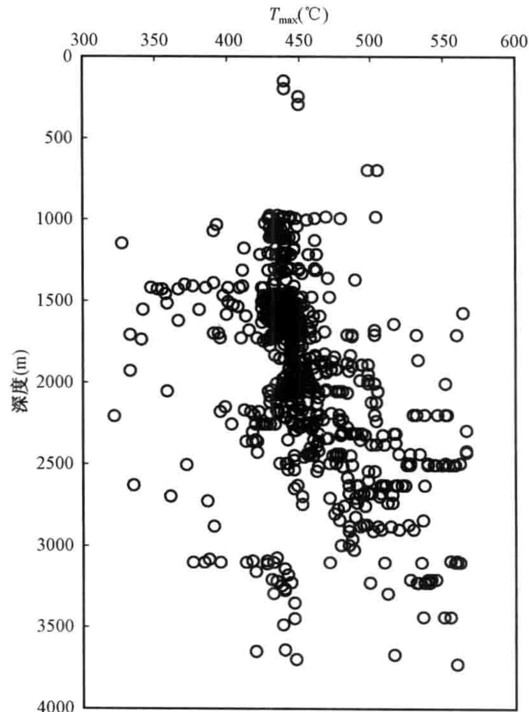


图 2－41　梨树断陷烃源岩热解峰温 T_{max}与深度关系图

（三）烃源岩生烃演化特征

为了更加清晰的展示梨树断陷烃源岩的热演化特征，笔者应用 PetroMod 1D 盆模软件分别绘制了重点区域典型井的单井地层埋深与热演化史曲线图。其基本原理是：在烃源岩埋藏史的基础上，根据研究区的构造演化史假设一相应的热史（地温梯度）演化模型，依此模型通过镜质组成熟演化的化学动力学模式计算出各烃源岩层的 R_o 值，然后用计算 R_o 值与实测的 R_o 值相比较。经过多次调整，如果两值吻合，那么假设的热演化模式就可以代表该区的热演化史。再依据温度与深度的关系，将等温线绘在该井的埋藏史曲线上。

主要选取中央构造带的后五家户地区 SN79 井和八屋地区 SN64 井以及东南斜坡带秦家屯地区的 SN148 井和双龙次凹 SN22 井作为典型代表分析梨树断陷烃源岩的热演化特征。

后五家户地区靠近梨树断陷的深凹区，断陷层在热演化程度定型之前一直处于持续埋深阶段。图 2－42 为 SN79 井单井地层埋深与热演化史曲线图，如图所示，登娄库组在沉积末期，其底部开始进入生烃门限（$R_o>0.5\%$）；在泉Ⅰ段沉积末期，底部已开始进入生烃高峰阶段（$R_o>0.7\%$）；在上白垩统嫩江组沉积中期得以定型，处于成熟阶段；营城组在沉积时期，其底部就已开始进入生烃门限（$R_o>0.5\%$）；在登娄库组沉积末期，营城组就已开始进入生烃高峰阶段（$R_o>0.7\%$）；在泉Ⅱ段沉积时期，开始进入高成熟阶段；在上白垩统嫩江组沉积中期（85Ma）达到最大埋深，成熟度定型，一直持续到现今，其上段处于成熟阶段，下段处于高成熟阶段。现今营城组烃源岩处于成熟—高成熟阶段，登娄库组烃源岩处于成熟阶段。

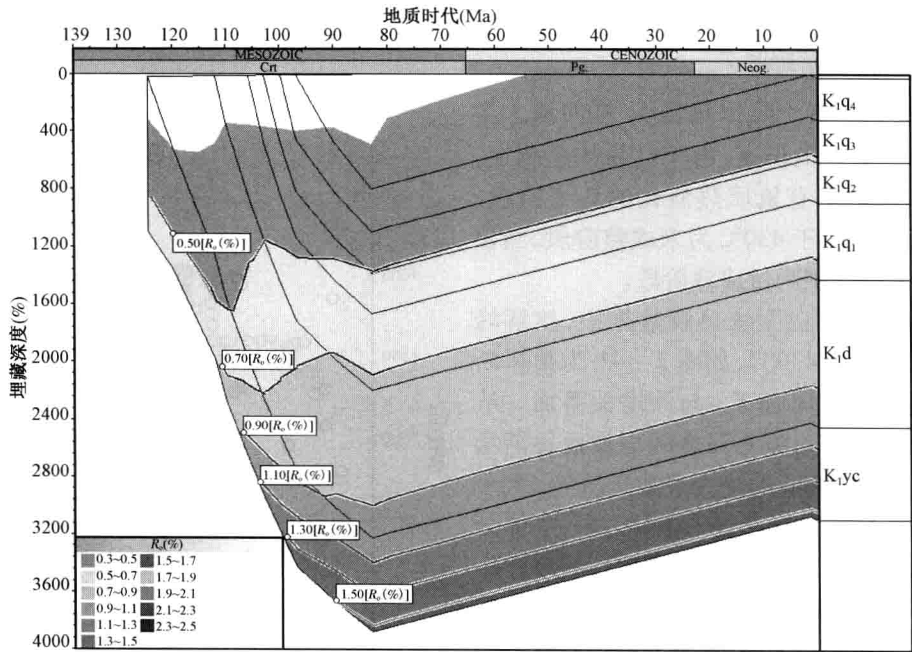


图 2－42　梨树断陷后五家户地区 SN79 井断陷层埋藏史与热演化史曲线图

图 2－43 为八屋地区 SN64 井单井地层埋深与热演化史曲线图。从图中可以看出，登娄库组烃源岩泉头组沉积中期（103Ma）就开始进入生烃门限（$R_o>0.5\%$），在上白垩统嫩江组沉积中期（85Ma）成熟度定型于低成熟阶段（$0.5\%<R_o<0.7\%$）。营城组烃源岩在泉头组沉积早期（110Ma），底部进入生烃门限（$R_o>0.5\%$），同样在上白垩统嫩江组沉积中期（85Ma）达

到最大埋深，烃源岩成熟度定型，除最顶部烃源岩外，其他层段已达到成熟阶段（0.7% < R_o < 0.9%）。沙河子组烃源岩大约在营城组沉积末期（120Ma）演化进入生烃门限（R_o > 0.5%）；在上白垩统嫩江组沉积中期（85Ma）达到最大埋深，烃源岩成熟度定型，上段 R_o 位于 0.7% ~ 0.9% 之间，下段 R_o 位于 1.1% ~ 1.3% 之间；后期地层逐渐抬升，沙河子组烃源岩成熟度未发生变化。

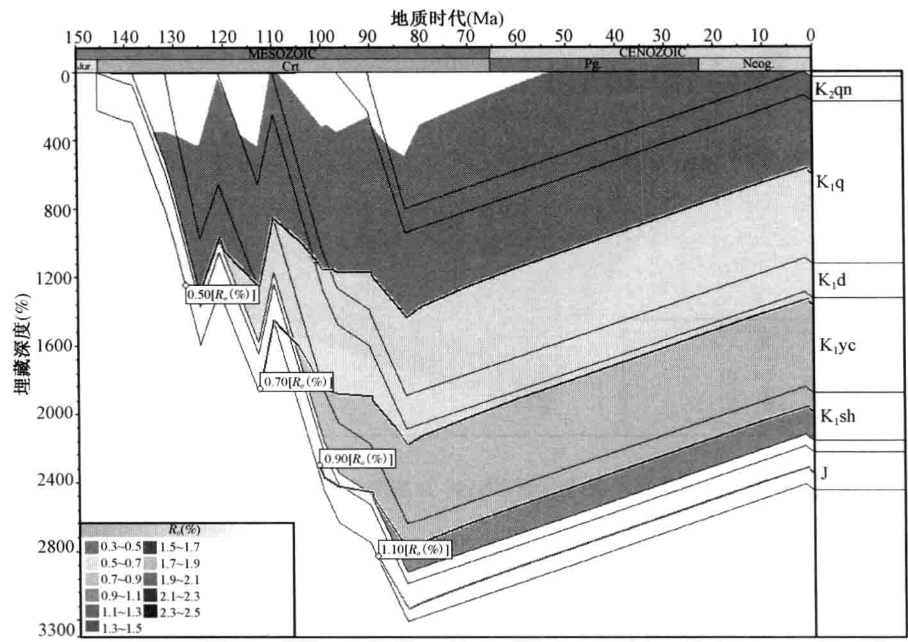


图 2-43 梨树断陷八屋地区 SN64 井断陷层埋藏史与热演化史曲线图

图 2-44 为 SN148 井单井地层埋深与热演化史曲线图。由图可知，登娄库组烃源岩在泉Ⅰ段沉积末期开始进入生烃门限（R_o > 0.5%），在上白垩统嫩江组沉积中期进入生烃高峰阶段，并随后定型，现今处于低成熟—成熟阶段。营城组在泉Ⅰ段沉积早期开始进入生烃门限（R_o > 0.5%）；在青山口组沉积时期，逐步进入生烃高峰阶段；在上白垩统嫩江组沉积中期（85Ma）达到最大埋深，成熟度定型一直持续到现今，仍处于成熟阶段；沙河子组烃源岩在营城组沉积早期就开始进入生烃门限（R_o > 0.5%），在泉Ⅰ段沉积中期开始进入生烃高峰阶段，同样在上白垩统嫩江组沉积中期（85Ma）达到最大埋深，成熟度得以定型，现今其处于成熟阶段。

图 2-45 为 SN22 井单井地层埋深与热演化史曲线图。可以看出，登娄库组在沉积中期时，其底部开始进入生烃门限（R_o > 0.5%），从青山口组沉积末期开始，整套地层进入生烃门限，成熟度定型于上白垩统嫩江组沉积中期（85Ma），至今一直处于低成熟阶段。营城组在沉积末期，其底部烃源岩就已开始进入生烃门限（R_o > 0.5%），在登娄库组沉积末期，营城组烃源岩开始进入成熟阶段，同样在上白垩统嫩江组沉积中期（85Ma）热演化程度得以定型，现今仍处于成熟阶段。

综合不同地区烃源岩的热演化特征来看，可以发现后五家户地区烃源岩进入生烃门限时间最早，热演化程度最高。营城组烃源岩进入生烃高峰阶段也存在先后顺序，后五家户地区营

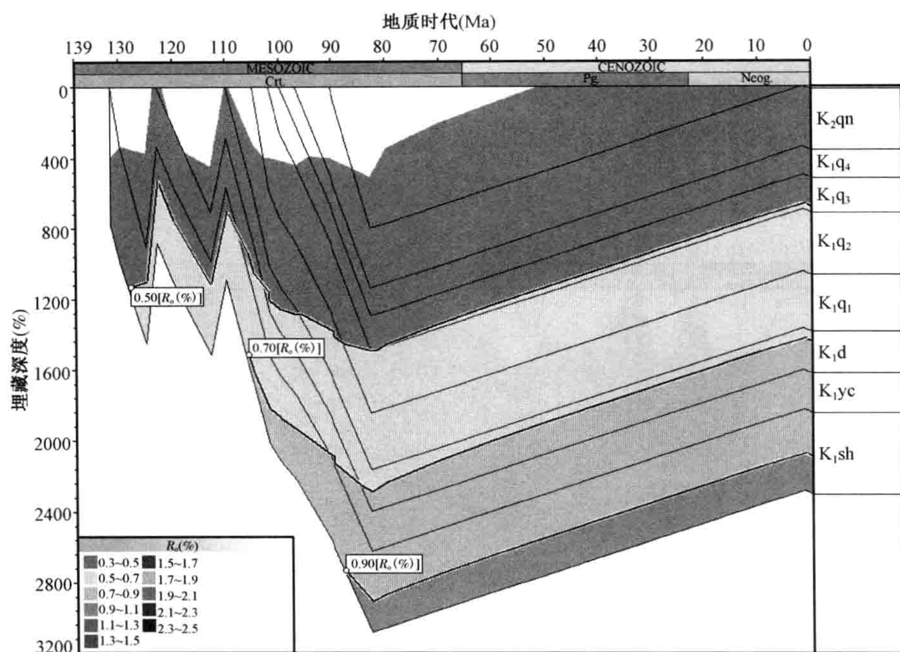


图 2-44　梨树断陷秦家屯地区 SN148 井断陷层埋藏史与热演化史曲线图

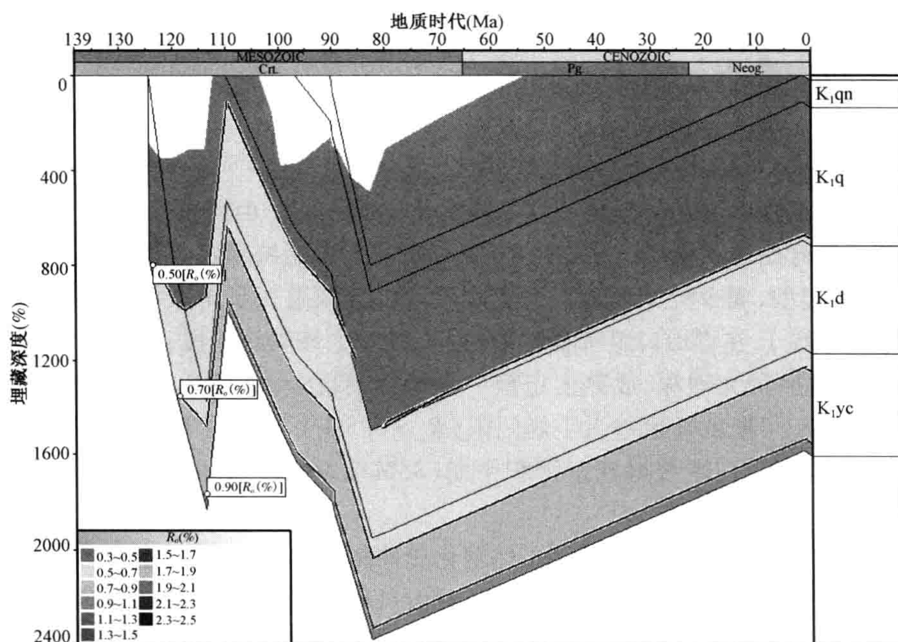


图 2-45　梨树断陷双龙次凹 SN22 井断陷层埋藏史与热演化史曲线图

城组烃源岩在 110Ma 开始进入生烃高峰阶段，八屋地区在 100Ma 左右开始进入，而秦家屯地区烃源岩基本在 90Ma 左右开始进入生烃高峰阶段。所有烃源岩热演化程度基本都在上白垩统嫩江组沉积中期（85Ma）定型，此后一直持续到现今。

第三节　可溶有机质组成

烃源岩中的有机质可分为可溶有机质和不溶有机质两个部分，在未成熟阶段，可溶有机质主要来源于生物残体及其衍生物，其生物标志化合物的分子组成能很好地反映烃源岩中原始母质来源特征；而处于成熟阶段的烃源岩，其可溶有机质主要是干酪根裂解的产物，其生物标志化合物地球化学特征也能较好的反映烃源岩的母质类型；但进入高成熟—过成熟阶段的烃源岩，其可溶有机质中的生物标志化合物则失去地球化学指示作用。笔者对研究区内断陷层烃源岩样品分别进行了索氏抽提和柱色层分类，并分别对饱和烃和芳香烃进行了色谱—质谱分析，下面将重点剖析梨树断陷烃源岩的地球化学特征，探讨不同地区不同层位烃源岩之间的差异性，为后续的油源对比奠定基础。

一、族组成

岩石经氯仿抽提后得到氯仿沥青“A”，再经柱色层分离分别得到饱和烃、芳香烃、非烃和沥青质组分。图 2－46 是梨树断陷烃源岩氯仿沥青“A”族组成三角图，从图上可以看出，登娄库组烃源岩饱和烃含量在 13.87% ～36.86%之间，芳香烃含量为 5.94% ～22.91%，非烃＋沥青质含量介于 50.45% ～75.41%之间；营城组烃源岩饱和烃较丰富，含量为 4.92% ～73.05%，芳香烃含量范围是 4.72% ～37.32%，非烃＋沥青质含量范围在 16.67% ～86.89%之间；沙河子组烃源岩饱和烃含量含量变化范围较大，在 3.85% ～85.37%之间，芳香烃含量为 4.12% ～26.28%，非烃＋沥青质含量范围介于 10.00% ～82.61%之间。总的来看，梨树断陷烃源岩氯仿沥青“A”的族组成中，各层段芳香烃含量相对较低，非烃＋沥青质含量高，饱和烃含量分布范围较大，且各层位存在一定差异，营城组含量较高，烃源岩族组成的差异反映了有机质母质来源、沉积环境以及后期的热演化程度的不同。

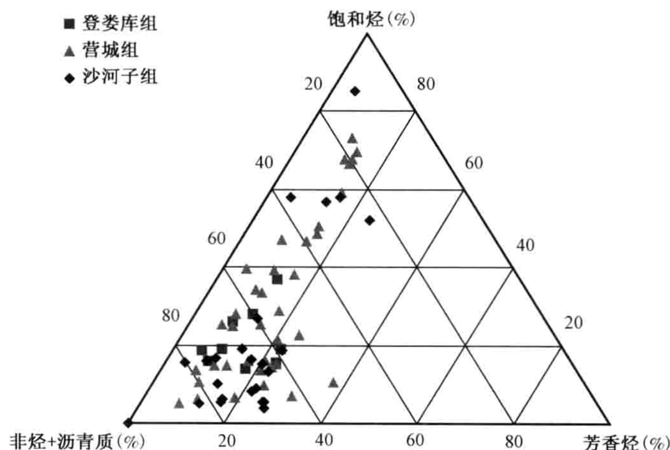


图 2－46　梨树断陷烃源岩氯仿沥青“A”族组成三角图

二、饱和烃地球化学特征

(一)正构烷烃组成特征

正构烷烃广泛分布于菌类、藻类及高等植物等生物体中，是相同碳数烃类中最稳定的化合物，为烃源岩抽提物饱和烃馏分中的主要成分，不仅能提供有关生烃母质方面的信息，而且还

能反映源岩的沉积环境和演化特征。不同来源的正烷烃的组成特征也有较大差异，如来源于浮游生物和藻类脂肪酸的低碳数正构烷烃，碳数分布范围小于 C_{20}；来源于高等植物蜡质的高碳数的正构烷烃，碳数分布范围以 C_{25+} 为特征。一般认为来自低等浮游生物的类脂体生源母质，其主峰碳靠近相对的低碳数，而且低碳部分较多，高碳数部分较少，分布呈前单峰型；而以高等植物为生源母质，则表现为主峰碳靠近高碳数，高碳数部分较丰富，低碳数部分贫乏，呈后单峰型。

1. 登娄库组

图2－47中，梨树断陷登娄库组多数烃源岩样品正构烷烃分布以呈后高双峰型为主，碳数分布在 C_9—C_{36}之间，主峰碳基本为 nC_{23}，表明其有机质来源既有低等水生生物，也有陆源高等植物的输入，高等植物占一定优势，轻重比 nC_{21-}/nC_{22+} 介于0.14～2.47之间。其中较为特殊的为双龙次凹的SN22井，以 nC_{17} 为主峰碳呈前峰单峰型分布，在 nC_{27}、nC_{29} 和 nC_{31} 明显具有奇偶优势，一般认为 nC_{27}、nC_{29} 和 nC_{31} 来源于陆源高等植物的蜡质（Tissot 和 Welte，1984；王启军等，1988）。由此可见，虽为前峰态分布，但该地区登娄库组高等植物的输入较为明显，这与其偏高的Pr/Ph一致。

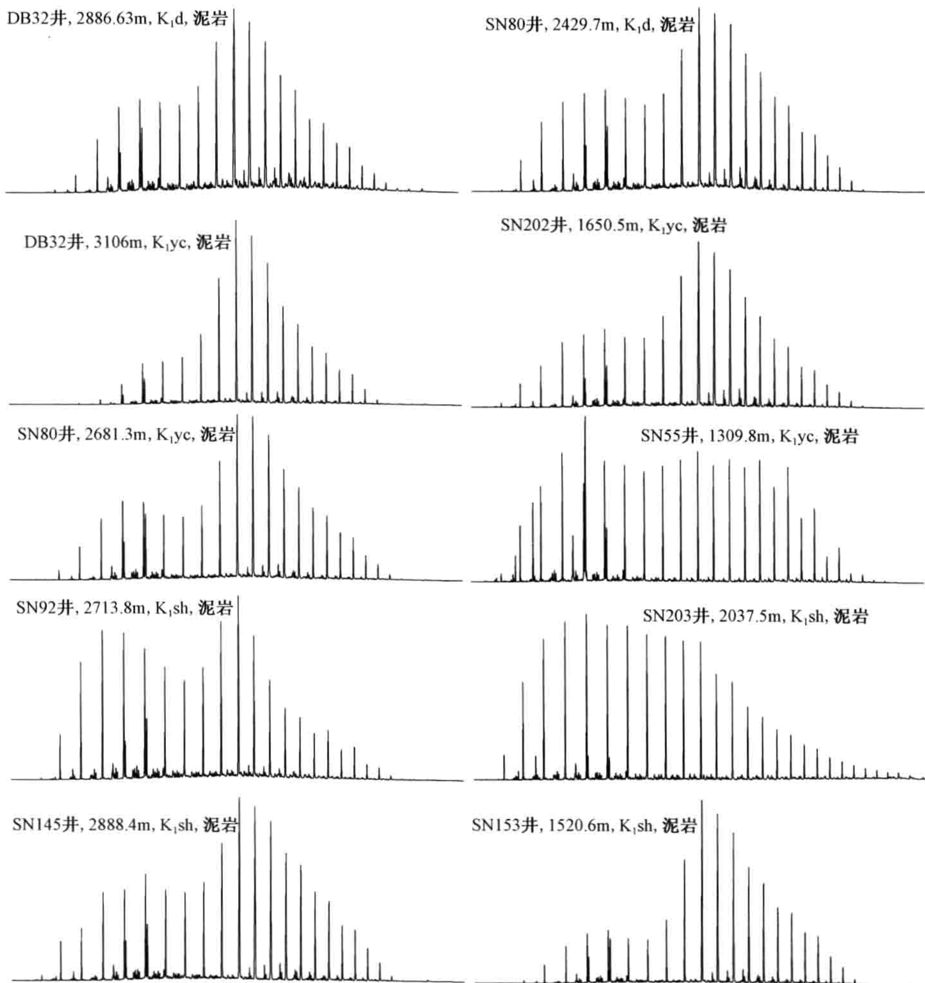


图2－47　梨树断陷烃源岩正构烷烃组成特征图（m/z 85）

2. 营城组

图2－47中营城组烃源岩多数样品正构烷烃正构烷烃分布以呈后高双峰型为主，碳数分布在C_{11}—C_{43}之间，主峰碳大多为nC_{23}（表2－9），部分样品呈后峰单峰型，这种分布特征表明营城组烃源岩有机质以低等水生生物和陆源高等植物的双重贡献为主，且高等植物输入占据优势，轻重比nC_{21-}/nC_{22+}变变化范围较大，在0.12～1.69之间，OEP值介于1.00～1.25之间，碳优势指数CPI值为1.08～1.31，主体分部在1.1～1.2之间，高值主要在双龙次凹的SN22井、SN55井和SW20井，分别为1.24、1.31和1.29，由此可见，这种特征与该区登娄库组烃源岩特征一致，揭示其高等植物输入较靠近深凹区的其他地区烃源岩更为明显。

3. 沙河子组

图2－47中沙河子组烃源岩多数样品正构烷烃分布为双峰型，且以后峰较高为主，碳数分布在C_{12}—C_{40}之间，主峰碳同样大部分为C_{23}（表2－9），表明沙河子组烃源岩有机质输入为低等水生生物和陆源高等植物的双重贡献，且高等植物略占优势，轻重比nC_{21-}/nC_{22+}介于0.19～2.00之间。OEP值变化范围在0.86～1.25之间，碳优势指数CPI值范围为1.08～1.30，基本分布于1.10～1.20之间，位于秦家屯地区东侧的SN146井样品最高，为1.30，表征了较为强烈的高等植物输入特征。

（二）类异戊二烯烃特征

规则的类异戊间二烯烷烃类广泛分布在现代沉积物、古代沉积岩及原油中，其中含量最多、分布最广的是iC_{19}的姥鲛烷和iC_{20}的植烷。一般认为姥鲛烷和植烷等类异戊间二烯类化合物主要来源于高等植物中的叶绿素、藻菌中的藻菌素等在微生物作用下形成的植醇，在弱氧化酸性介质条件下植醇易形成植烷酸，然后进一步脱羧形成姥鲛烷；在还原偏碱性介质条件下，植醇则经过不同的地球化学作用形成植烷（Tissot 和 Welte，1984；王启军等，1988；卢双舫等，2005）。因此，当烃源岩热演化程度相近和母源输入较为稳定的情况下，Pr/Ph值常用作判断烃源岩原始沉积环境氧化条件及水介质酸碱度的指标。一般来说，在沉积和早成岩阶段，厌氧强还原—还原环境有利于植烷的形成，弱氧化—氧化的淡水环境有利于姥鲛烷的形成。

梨树断陷登娄库组烃源岩样品分析数量有限，Pr/Ph分布于0.48～1.53之间，Pr/nC_{17}范围为0.33～0.67，Ph/nC_{18}变化区间为0.47～1.09，绝大多数样品具有明显的植烷优势，Pr/Ph小于0.8，反映出沉积环境的强还原性，仅双龙次凹SN22井样品Pr/Ph值较高，达1.53，表征其沉积于弱氧化—弱还原的淡水沉积环境（图2－48），这与其正构烷烃表现出来的生源特征也是比较一致的。

营城组烃源岩Pr/Ph变化范围较大，处于0.32～4.27之间，Pr/nC_{17}为0.12～2.22，Ph/nC_{18}介于0.14～1.12之间，大多数样品具有明显的植烷优势，Pr/Ph小于0.8，反映出沉积环境的强还原性；少数样品表现出弱还原—弱氧化的沉积环境，如SN65井和SN118井，主要位于八屋地区远离深凹区的一侧；另外，位于双龙次凹的SN22井和SN55井样品的Pr/Ph分别为3.79和4.27，表明其沉积环境的弱氧化性。总体上，由断陷西南向东北方向，沉积环境由强还原到弱还原—弱氧化，再到弱氧化性的一个变化趋势，这也对应着水体由深到浅的变化过程（图2－49）。

沙河子组烃源岩Pr/Ph分布于0.29～2.43之间，Pr/nC_{17}值范围为0.1～0.73，Ph/nC_{18}值范围为0.12～1.24，多数样品具有明显的植烷优势，Pr/Ph小于0.8，反映出沉积环境的强还原性；也有相当比例的样品Pr/Ph较高，主要分布于断陷东部的秦家屯地区，如SN148和SN152井Pr/Ph分别为1.37和2.43，另外，太平庄SW12井也较高，为1.55，表明其沉积环境的弱还

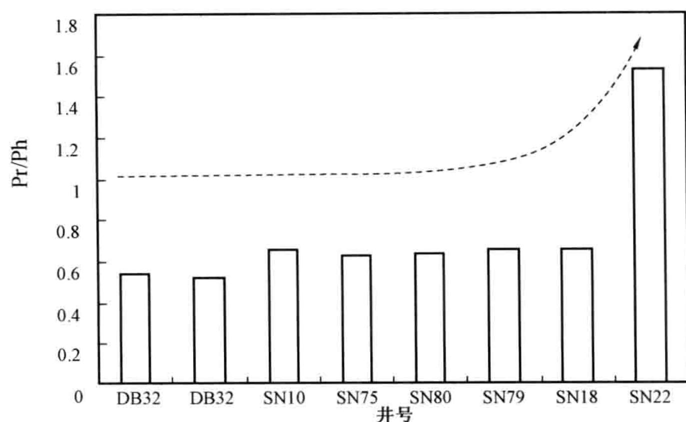


图 2－48　梨树断陷登娄库组烃源岩 Pr/Ph 比值变化

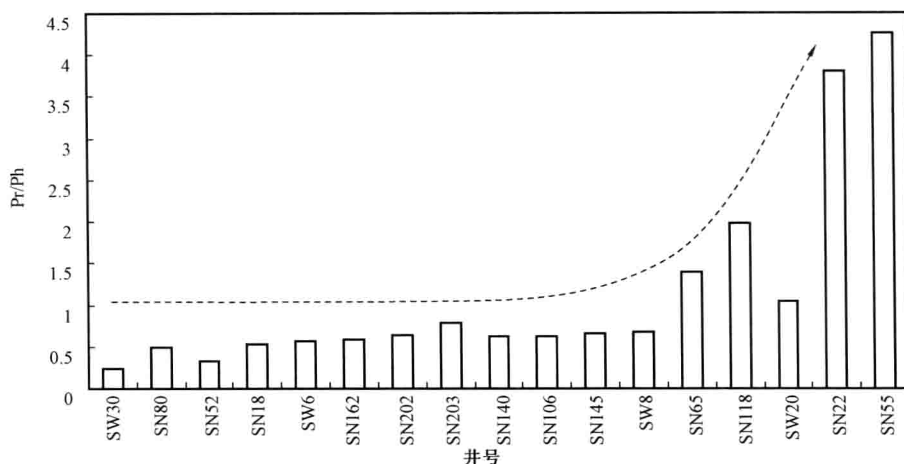


图 2－49　梨树断陷营城组烃源岩 Pr/Ph 比值变化

原—弱氧化性。可以看出，沙河子组烃源岩 Pr/Ph 具有明显的分带性，其沉积环境的变化趋势总体上由西向东，由强还原的深湖—半深湖过渡到到弱还原—弱氧化的滨浅湖相（图 2－50）。

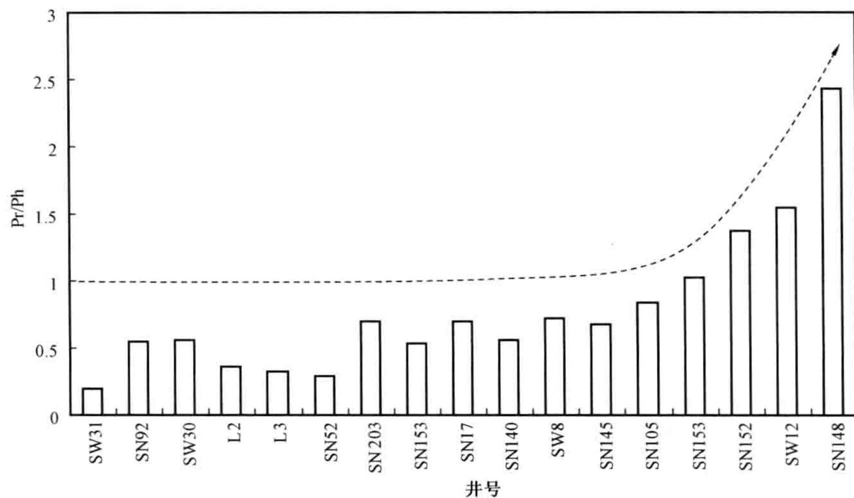


图 2－50　梨树断陷沙河子组烃源岩 Pr/Ph 比值变化

（三）萜类化合物

萜类化合物是指有环的类异戊二烯型化合物。国内外大量研究发现，萜类化合物的热稳定性和抵抗生物降解的能力均比正构烷烃强，所以在沉积有机质向烃类演化的过程中，它能以较稳定的有机化合物形式存在于地质体（包括沉积物、石油等）中，成为一种重要的生物标志化合物，主要包括补身烷（二环倍半萜）系列、三环萜烷系列、四环萜烷系列和藿烷系列。

1. 补身烷系列

烃源岩中最常见的双环倍半萜化合物的碳数分布范围在 C_{14}—C_{16}之间，其丰度最高者常为补身烷（C_{15}）和升补身烷（C_{16}），其次为补身烷的两个重排化合物。这类化合物的成因可能来自有关环状三萜烷的生物降解和热裂解。张春明等（2002）研究发现，双环倍半萜的分布与其海—陆相沉积环境密切相关，这表明其分布特征具有一定的意义。在梨树断陷烃源岩样品中普遍检测出该类化合物。

梨树断陷不同地区、不同层位代表性烃源岩氯仿沥青“A”中补身烷系列的质量色谱图（图2－51）表明，本区绝大部分烃源岩的补身烷系列以 $C_{16}-8\beta(H)$升补身烷为主。在重排补身烷、C_{15}补身烷的 $8\beta(H)$异构体以及 C_{16}升补身烷的 $8\beta(H)$异构体三者之间，多数样品 C_{16}升补身烷的 $8\beta(H)$异构体丰度依然最高，重排补身烷含量最低，C_{15}补身烷的 $8\beta(H)$异构体丰度介于二者之间，重排补身烷/$C_{15}-8\beta(H)$补身烷介于0.10～2.18之间，$C_{15}-8\beta(H)$补身烷/$C_{16}-$

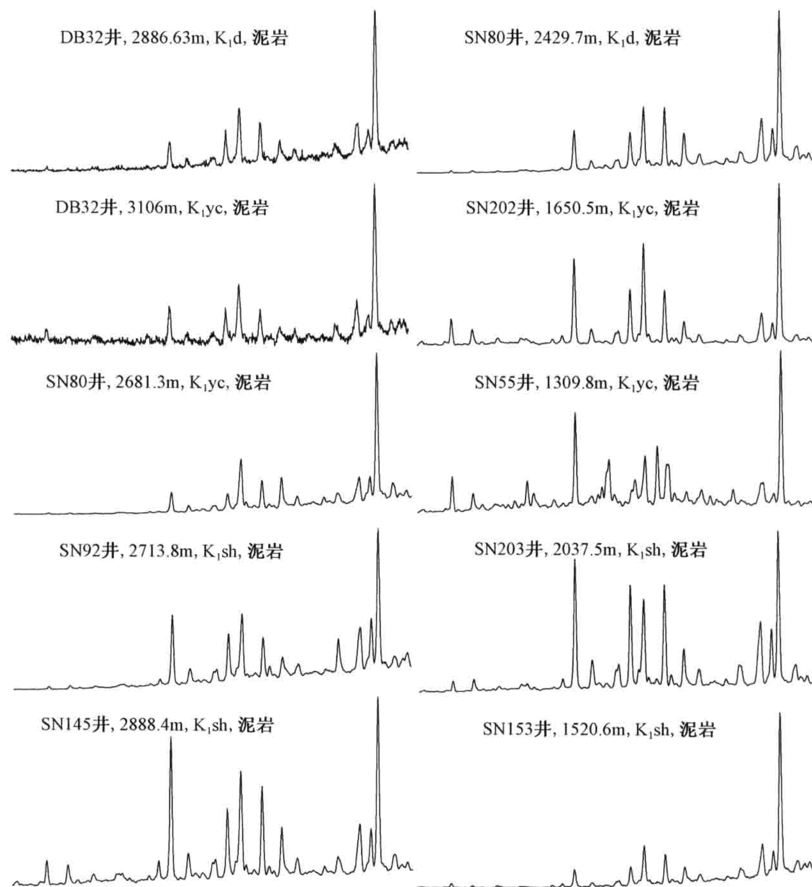


图2－51　梨树断陷烃源岩补身烷质量色谱图（m/z 123）

8β(H)升补身烷为0.24~2.05,最高值出现在L3井。一般认为,重排补身烷是在黏土矿物的催化作用下,补身烷在热演化过程中,C_{15}补身烷发生分子重排的产物。如图2-6所示,登娄库组、营城组和沙河子组烃源岩样品重排补身烷含量依次升高,可能很大程度上揭示了成熟度对重排补身烷含量的控制作用。

2. 三环萜烷与四环萜烷

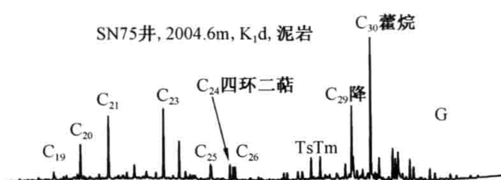
三环萜烷和四环萜烷系列是一类重要的生物标志化合物,它们在不同性质烃源岩中的分布和组成特征及浓度变化存在着显著差异。三环萜烷主要由微生物细胞膜中三环类异戊二烯醇形成,可能与某些菌藻类有一定的成因联系。四环萜烷主要为17,21-C_{24}断藿烷,它是在早期成岩阶段由藿烷E环C-17位至C-21位键断裂而形成。

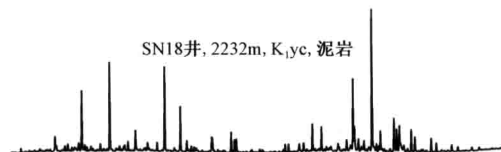
根据梨树断陷烃源岩可溶有机组成中饱和烃m/z 191质量色谱图中,三环萜烷分布大体可划分为三种:(1)三环萜烷呈C_{21}或C_{23}为主峰的正态分布,且含量较低,三环萜烷/藿烷值在0.45~1.78之间,C_{24}四环二萜含量较高,C_{24}四环二萜/C_{26}三环萜烷介于0.24~1.09之间,平均为0.54,三环萜烷的这种分布模式暗示着烃源岩形成于水体较深、还原相对较强且藻类贡献供应丰富的沉积相带,属于深湖—半深湖相烃源岩之特征(图2-52);(2)三环萜烷含量较低,呈C_{21}或C_{23}为主峰的正态分布,三环萜烷/藿烷值在0.06~0.34之间,平均为0.23,C_{24}四环二萜含量较高,C_{24}四环二萜/C_{26}三环萜烷介于0.57~5.09之间,平均为1.5,这种分布模式指示着烃源岩形成于水体较浅、还原性相对较弱且高等植物贡献供应较为丰富的沉积相带,属于浅湖环境烃源岩特征(图2-53);(3)三环萜烷含量低,呈现出C_{19}~C_{26}三环萜烷阶梯状依次降低的分布模式,C_{19}和C_{20}三环萜烷含量较高,三环萜烷/藿烷值在0.07~0.29之间,平均为0.14,C_{24}四环二萜含量很高,C_{24}四环二萜/C_{26}三环萜烷介于1.13~5.34之间,平均为2.88,这种分布模式指示着烃源岩形成于偏氧化性浅水环境,典型高等植物输入为主的沉积相带,属于滨湖—河流相烃源岩特征(图2-54)。

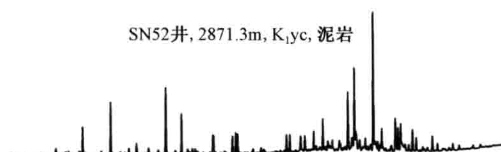
3. 五环三萜烷系列

五环三萜烷是由6个异戊二烯结构单元组成的五个环包含有30个碳原子的环烷烃。其可分为藿烷系列和非藿烷系列两类。藿烷类化合物主要来源于原核生物或细菌,细菌藿四醇是藿烷类化合物的前身,在原油和烃源岩中普遍存在,通常具一完整系列,是一种分布广泛且对地球化学影响重大的生物标志化合物。其分布和组成特征不仅可指示烃源岩形成的沉积环境的性质,还可指示有机质的来源和成熟度。

图2-52至图2-55中,藿烷系列化合物具有典型湖相烃源岩的分布特征,总体上C_{30}藿烷占绝对优势,其绝对浓度在饱和烃中最大达18.12μg/mg,C_{31}以上化合物较低,且随碳数增高呈递减型分布。伽马蜡烷是一种C_{30}的三萜烷,可以反映沉积水介质条件,被认为主要来源于原生动物和光合作用的细菌的四膜虫醇,通过还原作用形成的,常作为沉积水体咸度引起的水体分层标志,含量低指示淡水沉积环境(Peters和Moldowan,1993)。研究区内烃源岩饱和烃中普遍检测到了伽马蜡烷,伽马蜡烷/C_{30}藿烷值分布范围较大,介于0.02~2.77之间,不同地区该值分布差异明显,如图2-52所示,深湖—半深湖相烃源岩伽马蜡烷/C_{30}藿烷值普遍较高,分布在0.19~2.77之间,反映出微咸水—咸水的沉积环境;浅湖环境烃源岩其值分布在0.06~0.17之间,体现出微咸水—淡水的水体环境特征(图2-53);滨湖—河流相烃源岩该值最低,介于0.02~0.05之间,指示烃源岩形成于淡水环境(图2-54)。可见,由断陷中心向边缘,其水体盐度在逐渐降低,还原性逐渐减弱。







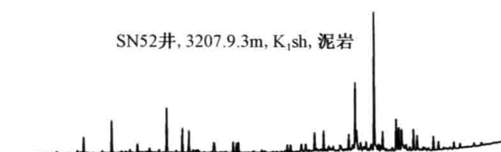
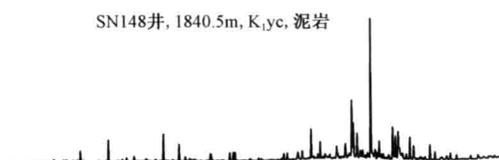
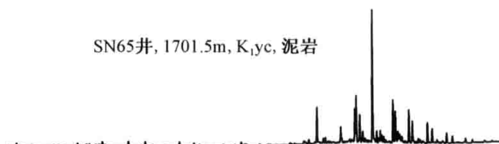
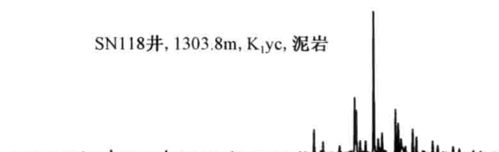


图 2－52 梨树断陷深湖—半深湖相烃源岩 m/z 191 质量色谱图







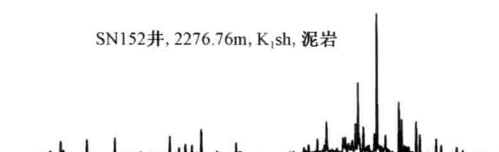
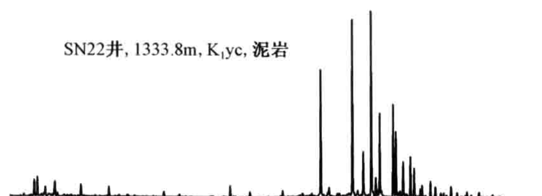
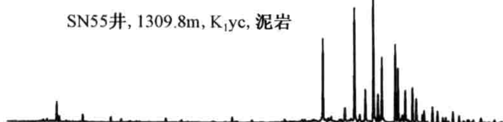
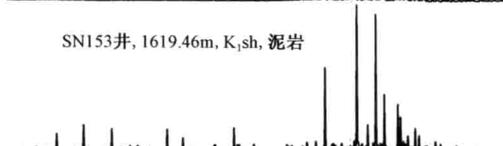


图 2－53 梨树断陷浅湖相烃源岩 m/z 191 质量色谱图







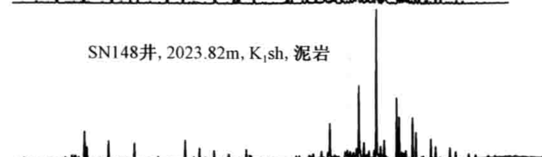
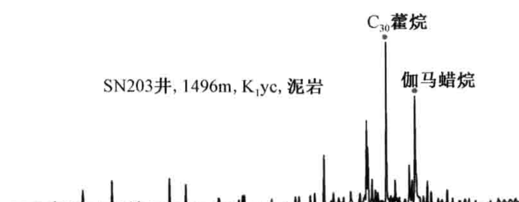
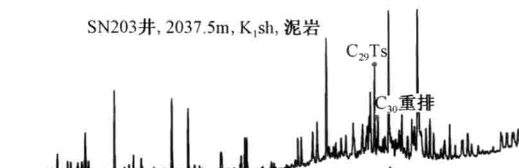


图 2－54 梨树断陷滨湖—河流相烃源岩 m/z 191 质量色谱图





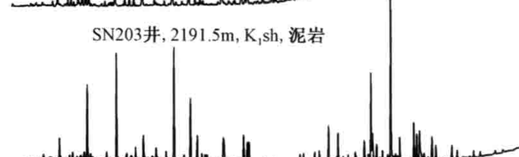


图 2－55 梨树断陷 SN203 井烃源岩 m/z 191 质量色谱图

伽马蜡烷/C_{30}藿烷在纵向上也表现出很强的非均质性,这在SN203井的泥岩样品中最能体现出来,随深度的增加,从营城组到沙河子组,伽马蜡烷/C_{30}藿烷值先增大后减小,充分体现了沉积古水体盐度的多变性,同时C_{29}Ts和C_{30}重排藿烷也显示相同变化特征(图2-55)。

C_{29}Ts和C_{30}重排藿烷也是湖相烃源岩中常见的生物标志化合物,且成因具有相似性,影响其分布的因素诸多,沉积环境和岩性(黏土矿物含量)是主要因素。重排藿烷可能是在弱酸性偏氧化(如:湖沼相)环境中,在黏土介质催化下,由细菌藿类经重排作用而形成(Moldowan,1991;Peters等,1993)。研究区内断陷层烃源岩饱和烃中也检测到了这两类化合物,但含量均较低,可以看出,大多数样品C_{29}Ts/C_{29}降藿烷小于0.5,C_{30}重排/C_{30}藿烷主要集中在0.05~0.20之间,部分样品显示出较高的C_{29}Ts/C_{29}降藿烷和C_{30}重排/C_{30}藿烷,如SN203井沙河子组2037.5m样品C_{29}Ts、C_{30}重排藿烷含量明显较高,两比值分别为1.6和0.73,反映出样品形成环境的还原性并不是太强。绝对定量分析表明,C_{29}Ts绝对含量和C_{30}重排藿烷多数在1μg/mg以下,高值主要分布在断陷边缘浅湖区,如SN118井(1303.8m,K_1yc)分别为5.17μg/mg和1.94μg/mg,SN148井(1840.5m,K_1yc)分别为1.48μg/mg和1.15μg/mg,表明弱还原—弱氧化半深湖—浅湖沉积环境利于此类化合物的形成,也可能跟其所含的黏土矿物有关。

Ts/Tm和C_{31}22S/(22S+22R)比值是比较常用的萜烷成熟度参数。C_{31}22S/(22S+22R)比值一般在镜质组反射率R_o约为0.55%~0.60%时即达到它的平衡终点,平衡值约为0.55~0.60,此时即使有机质的成熟度继续增加,该比值也不会随之增加。因此,C_{31}22S/(22S+22R)比值是一个适用于未成熟—低成熟阶段的成熟度指标。Ts/Tm一般随成熟度增加而增大,Ts/Tm>1表明烃源岩已达到成熟。本区烃源岩Ts/Tm分布在0.03~7.17之间,大部分样品的Ts/Tm小于1,而梨树断陷烃源岩已达成熟阶段,部分位于高成熟阶段,由此来看,该类烃源岩可溶有机质中的Ts与Tm的分布可能并不与成熟度有关,而是与沉积环境和生源具有一定联系。Peters和Moldowan(1993)及王春江等(2000)的研究已经注意到在偏氧化富含黏土矿物酸性催化条件下,Ts异常富集,这些都将会影响Ts/Tm作为成熟度参数的有效性。少数C_{29}Ts、C_{30}重排藿烷含量明显较高的样品同时也表现出了异常高Tm含量,而Ts含量极低的样品主要分布于双龙次凹,如SN22井和SN55井。

(四)甾烷化合物特征

甾烷是广泛分布于真核生物细胞壁中的甾醇、甾酮以及甾酸等前身经过成岩作用形成的、具有四个环的化合物,在动植物界含量都比较丰富,它是一类实用性较强的生物标志物,包括孕甾烷、C_{27}—C_{29}重排甾烷和规则甾烷,该类化合物可以提供有关有机质来源和成熟度等方面的信息。

断陷层烃源岩饱和烃中检测到孕甾烷和升孕甾烷,绝对定量分析表明,二者含量分别介于0.024~0.95μg/mg和0~0.55μg/mg,(孕甾烷+升孕甾烷)/甾烷分布在2%~15%之间。一般来说,随热演化程度的增加,孕甾烷和升孕甾烷含量逐渐增加,即高成熟烃源岩中这两类化合物含量会比较高,但梨树断陷烃源岩却并不具备这样的规律。所分析的样品并未达到高成熟阶段,R_o值主要介于0.7%~1.2%之间,相差不大,且(孕甾烷+升孕甾烷)/甾烷与C_{29}甾烷20S/(20S+20R)也并未表现出一定的相关性,说明成熟度不是烃源岩中孕甾烷和升孕甾烷表现出高值的主要原因,而图2-56中,孕甾烷+升孕甾烷/甾烷与C_{27}/C_{29}甾烷表现出了一定的相关性,表明母源可能对孕甾烷和升孕甾烷含量起着一定的控制作用,即孕甾烷和升孕甾烷与低等水生生物有着密切联系。

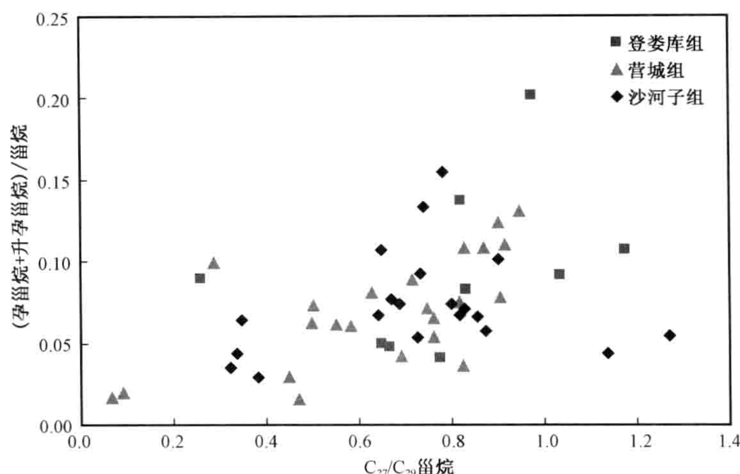


图 2-56　梨树断陷烃源岩(孕甾烷+升孕甾烷)/甾烷比值与 C_{27}/C_{29} 甾烷相关图

此外,从烃源岩质量色谱图上还可以发现个别样品具有较高的 $C_{29}\alpha\beta\beta$ 构型的甾烷,该类化合物含量随着成熟度的增加而增大,是相对比较稳定的一类化合物。仔细对比研究发现,在成熟度相近的烃源岩样品中,却出现了不同的 $C_{29}\alpha\beta\beta$ 构型甾烷分布,如 SN203 井 2037.5m 的 K_1sh 样品,其 R_o 为 0.83%,$C_{29}\alpha\beta\beta$ 构型甾烷含量较高,说明热演化程度可能不是其含量高的主要原因。孟仟祥(1995)在对低演化烃源岩样品研究中,发现某些成熟度很低的样品中,C_{29} 甾烷 20S/(20S+20R)参数比较低,而 C_{29} 甾烷 $\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 却显示异常高的特点,而这些地区古环境中细菌微生物都比较发育,故认为异构化参数 C_{29} 甾烷 $\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 可能是细菌微生物敏感参数。

图 2-57 为梨树断陷不同层位烃源岩甾烷系列质量色谱图(m/z 217)。从图中可看出甾烷系列化合物的相对组成特征,大体分为 3 种分布模式:(1)其 $C_{27}\alpha\alpha\alpha R$、$C_{28}\alpha\alpha\alpha R$ 和 $C_{29}\alpha\alpha\alpha R$ 相对组成分布呈近似对称“V”字形,$C_{27}\alpha\alpha\alpha R$ 峰略低于 $C_{29}\alpha\alpha\alpha R$,高等植物略占优势,该模式也是梨树断陷烃源岩甾烷分布的主要模式;(2)$C_{27}\alpha\alpha\alpha R$、$C_{28}\alpha\alpha\alpha R$ 和 $C_{29}\alpha\alpha\alpha R$ 相对组成分布呈不对称“V”字形,$C_{27}\alpha\alpha\alpha R$ 高于 $C_{29}\alpha\alpha\alpha R$,反映其低等水生生物略占优势,这类组合特征较少出现,仅在 SW30 井 3233m 处 K_1sh 泥岩、L2 井 2909.3m 处 K_1sh 泥岩、L3 井 2761.9m 处 K_1sh 泥岩和 SN79 井 1834.88m 处 K_1d 泥岩样品中出现,可以明显看出这些样品基本分布于靠近桑树台断裂带的洼陷区;(3)$C_{27}\alpha\alpha\alpha R$、$C_{28}\alpha\alpha\alpha R$ 和 $C_{29}\alpha\alpha\alpha R$ 相对组成分布呈反“L”形,表征其母源输入以高等植物为主,是典型的高等植物母质类型,如 SN22 井 1048.3m 处 K_1d 泥岩、SN55 井 1309.8m 处 K_1yc 泥岩、SN148 井 2023.82m 处 K_1sh 碳质泥岩和 SN153 井 1619.46m 处 K_1sh 泥岩样品,由此可以看出这种分布特征主要集中在双龙和秦家屯地区。从上述规则甾烷 $C_{27}\alpha\alpha\alpha R$、$C_{28}\alpha\alpha\alpha R$ 和 $C_{29}\alpha\alpha\alpha R$ 分布模式可以看出,梨树断陷烃源岩的母源供给为低等水生生物与高等植物的混合物,以高等植物略占优势,这与烃源岩有机质类型的分析较为一致。

规则甾烷的分布常指示一定的生源信息,现代浮游生物中以 C_{27} 甾醇为主,而在高等植物中 C_{29} 甾醇占优势。对于中、新生代地层,C_{27} 和 C_{29} 甾烷的相对含量仍是一项有机质生源构成的良好参数(Peters K E 等,1993)。C_{29} 甾类占主要优势指示强烈的陆源输入,母质以低等生物(藻类等)为主的有机质富含 C_{27} 甾类。大部分烃源岩样品具有 C_{29} 甾烷优势的特征,表征了其

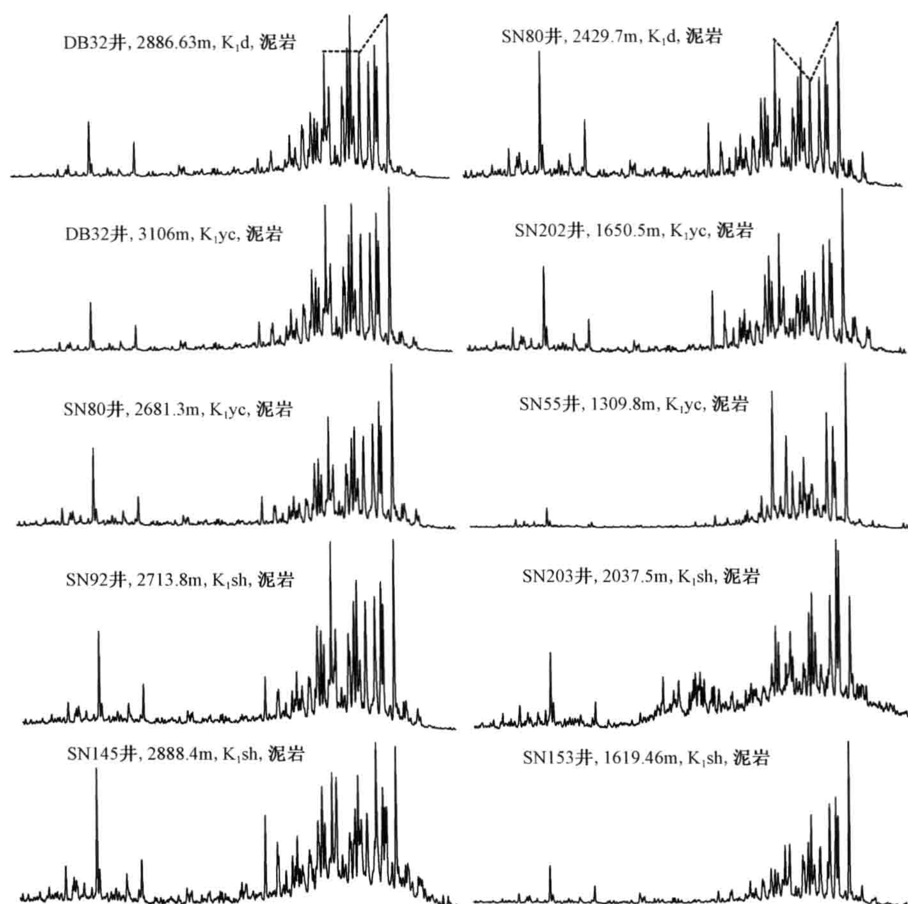


图 2－57　梨树断陷烃源岩氯仿沥青“A”的 m/z 217 质量色谱图

陆源输入贡献大。从 $\alpha\alpha\alpha$(R)构型甾烷的 C_{27}—C_{28}—C_{29}分布三角图(图 2－58)看,登娄库组烃源岩有机质以混合源输入为主,少数样品以陆源植物为主;营城组烃源岩有机质以混合源输入为主,部分样品明显表现出有机质以陆源植物为主,其中个别样品,如双龙次凹 SN22 井 1333.8m 和 SN55 井 1309.8m 处的样品,为典型的陆源植物输入;沙河子组烃源岩有机质以混合源输入为主,少数以陆源植物为主。总体上,梨树断陷各层组烃源岩有机质在以陆源高等植物和低等水生生物双重来源的同时,更偏向于陆源高等植物为主,显示了断陷湖盆烃源岩发育的典型特征。

甾烷演化特征可以判断和划分有机质的热演化阶段,尤其是甾烷化合物的立体异构化比值是有效的成熟度指标。随着成熟度的增加,甾烷的 α 构型向 β 构型转化和生物构型 R 向地质构型 S 转化,表现为甾烷 $C_{29}-\alpha\beta\beta/(\alpha\beta\beta+\alpha\alpha\alpha)$ 和 C_{29} 甾烷 $\alpha\alpha\alpha$20S/(20S + 20R)的比值逐渐增加。Peters 等人将 C_{29} 甾烷 $\alpha\alpha\alpha$20S/(20S + 20R)比值为 0.25 和 0.42 分别定为未成熟与低成熟的界限以及低成熟与成熟的界限,将 $C_{29}\alpha\beta\beta/(\alpha\beta\beta+\alpha\alpha\alpha)$ 比值为 0.27 和 0.43 分别定为未成熟和低成熟以及低成熟和成熟的界限。研究区内断陷层烃源岩样品 C_{29} 甾烷 $\alpha\alpha\alpha$20S/(20S + 20R)比值介于 0.47 ~ 0.82 之间,已达平衡值;$C_{29}\alpha\beta\beta/(\alpha\beta\beta+\alpha\alpha\alpha)$ 比值为 0.23 ~ 0.57,图 2－59 为梨树断陷烃源岩 $C_{29}\alpha\alpha\alpha$20S/(20S + 20R)与 $C_{29}\alpha\beta\beta/(\alpha\beta\beta+\alpha\alpha\alpha)$ 关系图,如

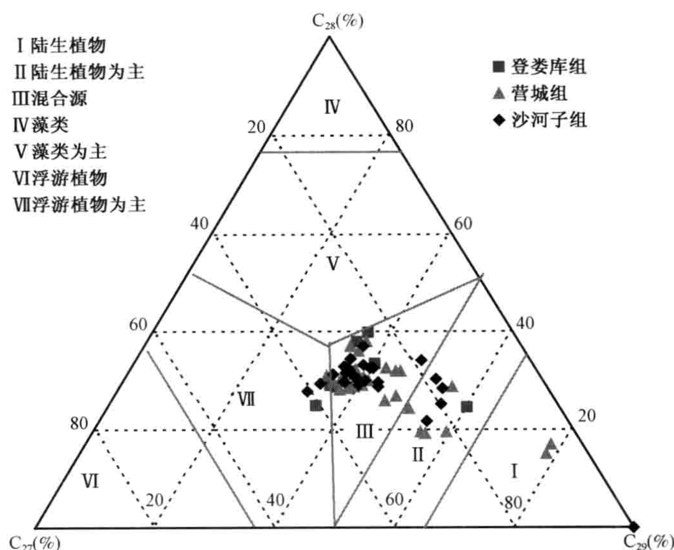


图 2－58　梨树断陷烃源岩 C_{27}—C_{28}—$C_{29}\alpha\alpha\alpha$(R)甾烷分布三角图

图所示，所有样品都处于成熟区域，双龙次凹 SN22 井登娄库组和 SW20 井营城组样品两参数值明显偏低，与双龙次凹成熟度较低的特征一致。烃源岩样品 $C_{29}\alpha\alpha\alpha$20S/(20S＋20R)基本已达 0.5 左右(0.52～0.55)，已基本达平衡值范围，可能表征大多数样品已达成熟或高成熟阶段。总体来看，梨树断陷绝大多数烃源岩目前处于成熟阶段，部分已达生油高峰或高成熟阶段。

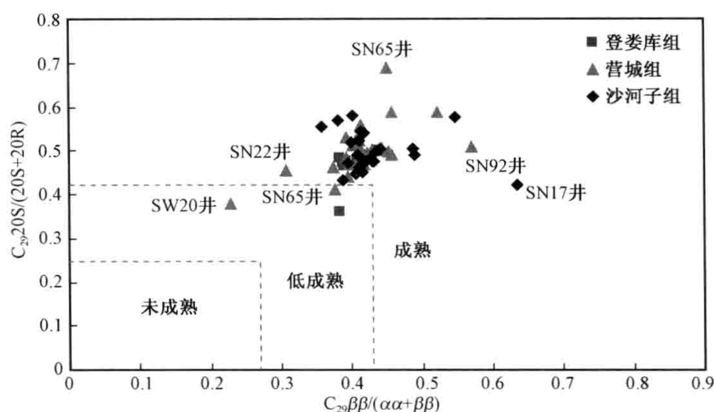


图 2－59　梨树断陷烃源岩甾烷成熟度参数相关图

三、芳香烃地球化学特征

多环芳香烃是烃源岩可溶有机质中的重要组成部分，由环数不同、芳构化程度不同、取代基数目不同的化合物组成，主要有萘系列、菲系列、联苯系列、蒽、䓛、芘、卡达烯、惹烯、荧蒽以及含氧、含硫的杂环芳烃等化合物，其中联苯系列、卡达烯、惹烯、荧蒽和芘等化合物来源于高等植物，芳香烃化合物的分布与组成特征也能提供丰富的有关母质来源、沉积环境和有机质成熟度等方面的地球化学信息。

(一)宏观组成特征

研究区内烃源岩芳香烃中检出了萘系列、菲系列、䓛系列、联苯系列、芴系列、二苯并噻吩系列和二苯并呋喃系列等化合物,同时还发现了苝等典型的高等植物输入标志的芳香烃类化合物,反映出梨树断陷烃源岩母源输入有高等植物的贡献。图2-60为梨树断陷烃源岩各主要化合物系列相对含量直方图,从图中可以看出,萘和菲系列化合物在芳香烃化合物中占绝对优势,两者基本占芳香烃总量的50%以上;其次是䓛和芴系列化合物,占芳香烃组分的大约20%,其他化合物系列相对含量相差不大,相对含量基本位于1%~5%之间。从萘系列来看,登娄库组烃源岩相对含量最高,其次是营城组,沙河子组相对含量最低;而菲系列特征正相反,沙河子组烃源岩含量最高,其次是营城组,登娄库组最低。

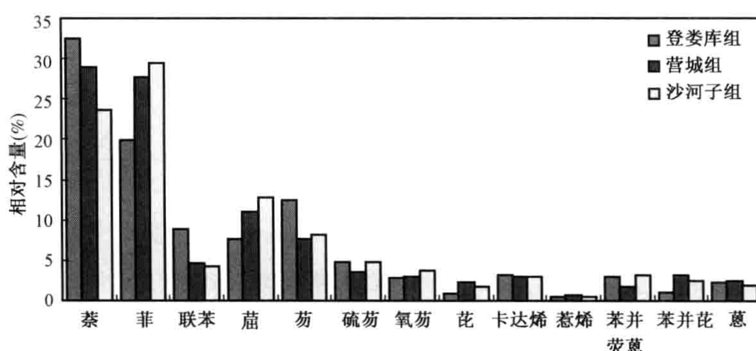


图2-60 梨树断陷烃源岩芳香烃化合物相对含量直方图

(二)芳香烃成熟度参数

1. 烷基萘参数

随着成熟度增加,多甲基萘系列中热稳定性强的异构体含量升高,因此可以用多甲基萘系列的分布特征来研究有机质的热演化程度。α-位取代萘异构体的空间阻碍作用强于β-位,且热稳定性比β-位差,所以β-位取代萘与α-位取代萘异构体的比值可以用作成熟度参数,多甲基萘成熟度指标可作为研究烃源岩的很好参数。研究区烃源岩2,6+2,7-二甲基萘/1,5-二甲基萘(DNR)分布在1.08~13.76之间,换算为镜质组反射率R_{c_1}介于0.58~1.72之间,总体显示出烃源岩已达到成熟阶段(Radke等,1982;van Aarssen等,1992)。2,3,6-三甲基萘与2,3,6+1,2,5-三甲基萘比值(TMNr)和1,3,6,7-四甲基萘与1,3,6,7+1,2,5,6-四甲基萘比值(TeMNr)可用于确定低—高成熟整个热演化阶段的成熟度,并不受运移过程分馏效应的影响,对成熟度的变化反应灵敏(van Aarssen等,1999),成熟原油和烃源岩的这两个比值均要在0.4以上。梨树断陷烃源岩中2,3,6-三甲基萘与2,3,6+1,2,5-三甲基萘比值介于0.22~0.96之间,1,3,6,7-四甲基萘与1,3,6,7+1,2,5,6-四甲基萘比值介于0.18~0.91之间,如图2-61所示,梨树断陷烃源岩三甲基萘比值与四甲基萘比值相关性非常好,绝大多数烃源岩样品位于TMNr和TeMNr值大于0.4的成熟区域,说明这些样品已达到成熟阶段,部分样品达到高成熟阶段。位于低成熟区域的样品主要来自双龙次凹SN22井和SN55井,或断陷边缘地区,如太平庄SW12井和SN153井、北部斜坡SN140井、秦家屯SN148等井的烃源岩样品。

2. 烷基菲参数

Radke等(1981)提出利用菲及甲基菲的相对丰度计算成熟度的参数—甲基菲指数

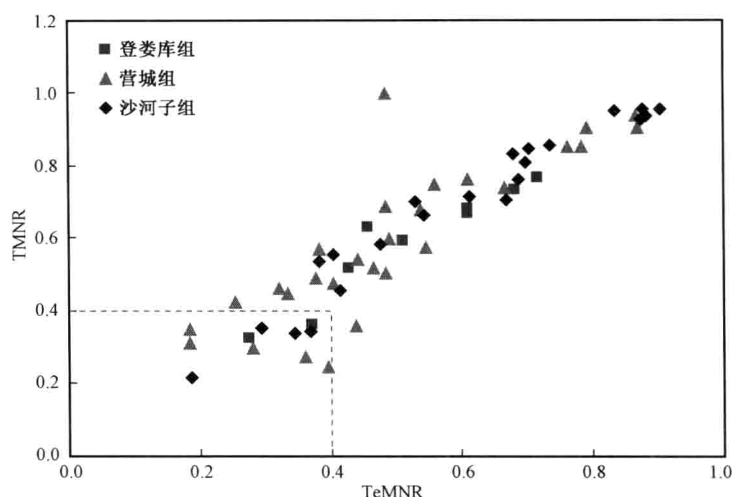


图 2-61　梨树断陷烃源岩三甲基萘与四甲基萘成熟度参数相关图

(MPI_1,MPI_2),得出了由 MPI_1 折算镜质组反射率 R_o 的方法后,国内外学者对此进行了系列探索和研究。梨树断陷登娄库组烃源岩样品 MPI_1 值介于 0.11～0.71 之间,营城组和沙河子组样品 MPI,范围分别为 0.05～1.08 和 0.14～1.0,总体来看营城组和沙河子 MPI_1 值较高,但是随着深度的增加,甲基菲指数并没有表现出很好的规律性(图 2-62),同时根据换算所得出的 Rc_2 介于 0.48%～1.0% 之间,明显低于实测的镜质组反射率 R_o,二者最大相差 1%(图 2-63)。可见,MPI_1 值不能正确的反映梨树断陷烃源岩的成熟度。

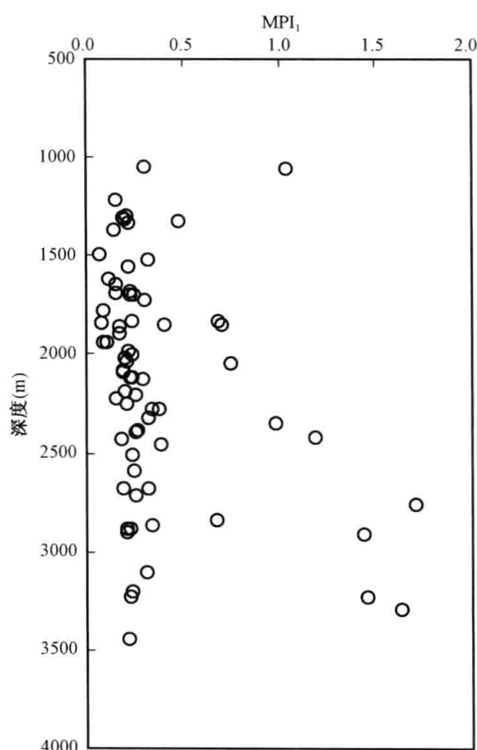


图 2-62　梨树断陷烃源岩甲基菲指数 MPI_1 与深度变化关系图

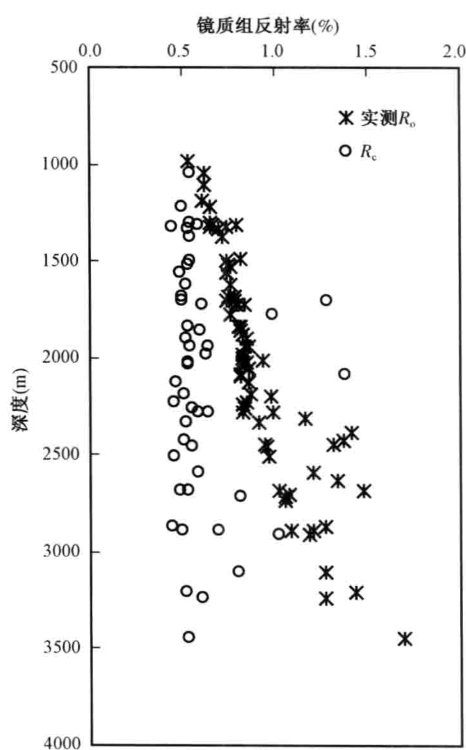


图 2-63　梨树断陷烃源岩镜质组反射率与深度变化关系图

第四节 烃源岩综合评价

在单井钻井资料、有机地球化学分析和测试数据以及测井评价等的基础上，笔者分别对研究区断陷层的登娄库组、营城组和沙河子组烃源岩进行了综合评价。

一、登娄库组

图2－64为梨树断陷登娄库组烃源岩综合评价图，从图中可以看出，桑树台洼陷带TOC均值可达4.58%以上，小城子地区和双龙次凹TOC均值分别为1.11%和2.02%，其他地区TOC值较低，大多为差—非烃源岩。登娄库组烃源岩在桑树台靠近断裂最为发育，好烃源岩主要分布在十屋—后五家户—DB32井一线以西区域，优质烃源岩主要分布于SN89井到孤家子地区一带；八屋部分地区、北部斜坡和秦家屯地区基本不发育烃源岩。登娄库组烃源岩分布区基本已进入热演化成熟阶段，好烃源岩基本位于高成熟阶段，优质烃源岩已经处于过成熟阶段，以生气为组。成熟度显现出自西往东成熟度逐渐降低的趋势。双龙次凹主要分布差—中等烃源岩，中等烃源岩已达成熟阶段。

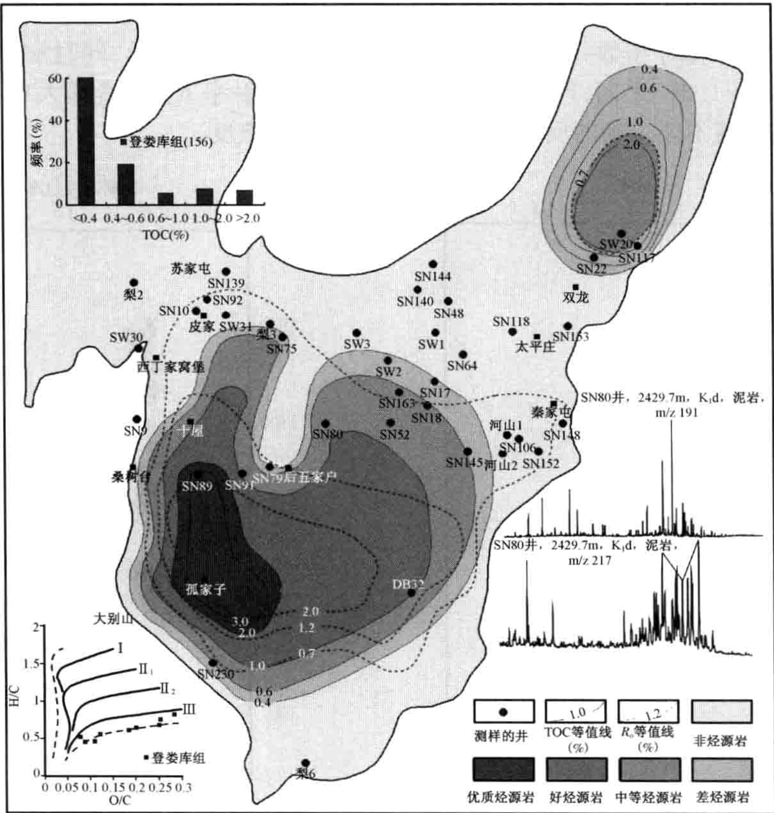


图2－64 梨树断陷登娄库组烃源岩综合评价图

二、营城组

营城组烃源岩主要在断陷西南部深凹带和双龙次凹较为发育，其中断陷西南部孤家子东

北部区域为优质烃源岩分布区，好烃源岩基本分布于孤家子—十屋—后五家户一带，上述范围内烃源岩 TOC 基本位于 3.0% 以上。八屋部分地区主要分布中等烃源岩，秦家屯和北部斜坡地区基本无烃源岩分布。苏家屯次洼和双龙次凹均发育一定的好—中等烃源岩。由此来看，营城组好烃源岩基本位于断陷深凹区，北部和东南斜坡带基本以差—非烃源岩为主。有机质类型主要以 II_2—Ⅲ型为主，深凹区可能含一定的 II_2、II_1 和 I 型，断陷边缘有机质类型主要为Ⅲ型。有机质成熟度变化范围较大，断陷西南部分布的好烃源岩已经进入了过成熟阶段，以生气为主；后五家户地区烃源岩处于高成熟阶段，以生凝析油气为主；双龙次凹和苏家屯次洼烃源岩基本已进入成熟阶段，以生油为主（图 2－65）。综合评价来看，梨树断陷营城组主力烃源岩位于十屋—后五家户 SN80 井—小城子 DB32 井以西的深凹区，现今热演化程度以油气并举为主。

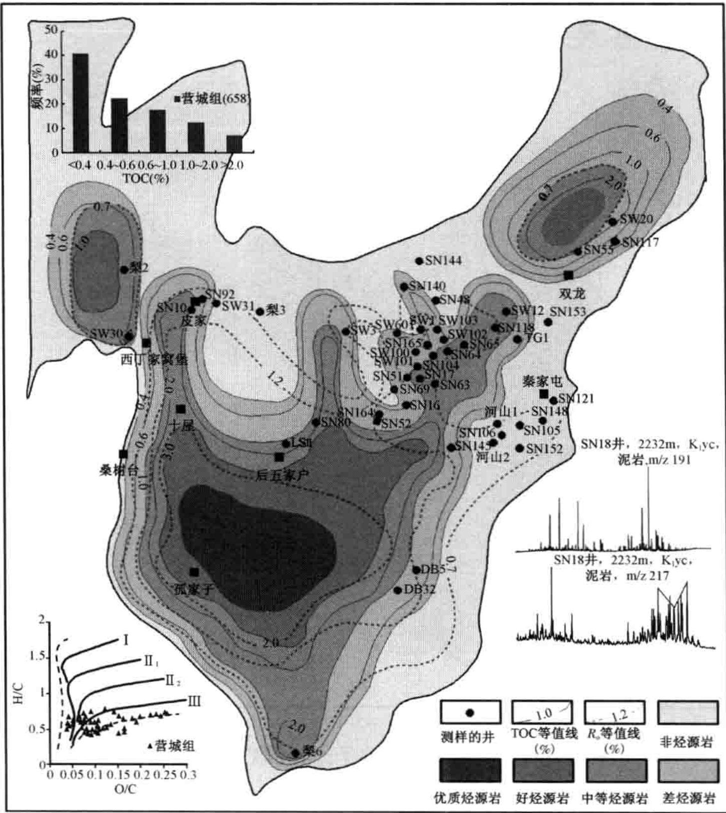


图 2－65　梨树断陷营城组烃源岩综合评价图

三、沙河子组

沙河子组烃源岩的分布明显受到桑树台断裂的控制。优质烃源岩同样分布于孤家子和后五家户之间的区域，好烃源岩受到断裂控制，主要分布于皮家—十屋—孤家子—后五家户一带，烃源岩 TOC 在 2.0% 以上，核心区烃源岩 TOC 为 3.0% 以上。此外，秦家屯、双龙次凹和苏家屯次洼也发育一定好烃源岩，TOC 大于 1.0% 的烃源岩分布较为广泛。有机质类型主要为 II_2—Ⅲ型，深凹区类型可能偏好，为 II_2、II_1 和 I 型，断陷边缘斜坡带主要为Ⅲ型。有机质成熟度明显较营城组更大，烃源岩分布区已基本步入成熟阶段（$R_o > 0.7\%$）。八屋和秦家屯地

区烃源岩主要处于成熟阶段，以生油为主；皮家—后五家户—DB32 井以西烃源岩已达高成熟阶段，油气并举，优质烃源岩分布的深凹区 R_o 高达 2.0% 以上，以生气为主。成熟度总体自西往东逐渐降低，缓坡带目前主要处于成熟阶段，以生油为主（图 2－66）。综合评价来看，梨树断陷沙河子组烃源岩为中等—好烃源岩主要分布于秦家屯和八屋等断陷边缘斜坡区，以生油为主，好—优质烃源岩主要位于沿桑树台断裂的深凹区，以油气并举为主，核心区分布的优质烃源岩以生气为主。

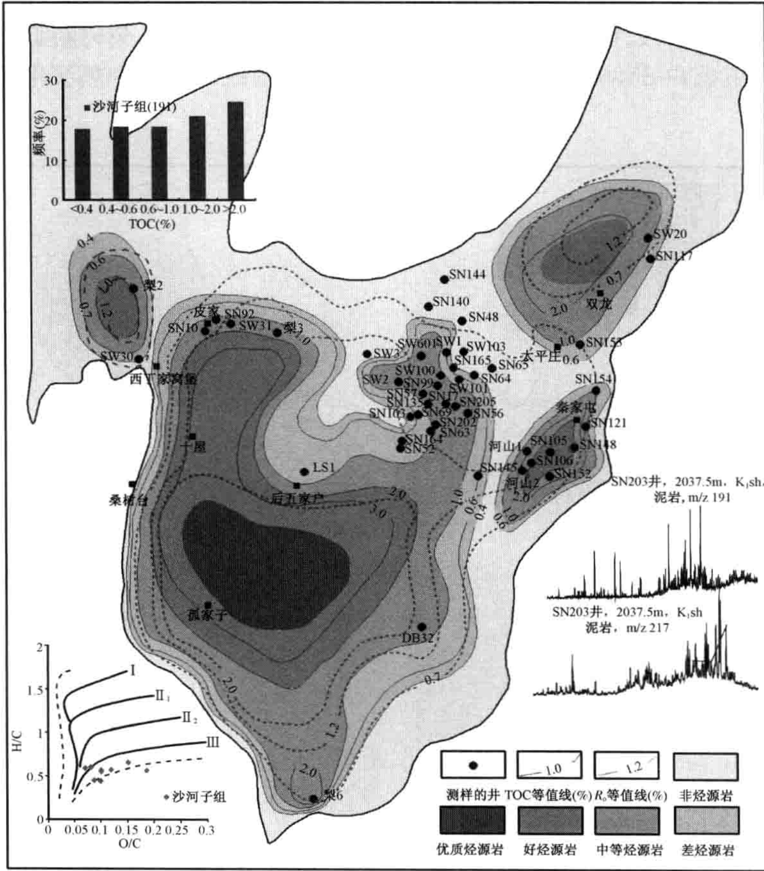


图 2－66　梨树断陷沙河子组烃源岩综合评价图

第三章　原油成因与分类

梨树断陷原油主要来源于十屋—四五家子—八屋中央油气富集区以及东部七棵树、太平庄和秦家屯地区，主要富集于泉头组、登娄库组和营城组这几个含油气层。研究区深部为原生油气藏，浅部为次生油气藏，部分地区油藏因嫩江组末期构造运动有轻微氧化现象。目前研究区内的原油以中质油为主，部分为轻质凝析油，少量为重质油。笔者对梨树断陷原油进行了系统取样，样品涵盖研究区内四个构造区带的泉头组、登娄库组、营城组、沙河子组和火石岭组，本章以色谱、色谱—质谱和色谱—同位素质谱等方法，系统地分析了梨树断陷不同地区不同层位原油的地球化学特征，并揭示了研究区原油的成因类型。

第一节　原油物性特征

梨树断陷原油颜色主要有黑色、黄色、黄褐色、棕黑色，其中绝大多数原油颜色为黑色，主要集中分布在秦家屯、四五家子泉头组与登娄库组、八屋油田（除 BK60 区块和 SN54 区块外）和七棵树油田沙河子组，八屋油田 BK60 区块、SN54 区块、皮家地区营城组与沙河子组原油主要为黄色、黄褐色、棕黑色。梨树断陷绝大多数原油密度介于 0.82 ~ 0.9g/cm^3 之间，占样品总数的 77%，另外各有 10% 的原油样品密度在 0.78g/cm^3 以下和 0.78 ~ 0.82g/cm^3 之间，仅 2 个原油样品的密度大于 0.9g/cm^3（图 3 – 1a），原油密度分布特征显示出梨树断陷原油包括凝析油、轻质油、中质油和重质油，以中质油为主，重质油仅有零星分布；原油含蜡量普遍较高，97% 的样品含蜡量在 8% 以上（图 3 – 1b），如果将含蜡量 8% 作为高蜡原油的划分标准，梨树断陷原油主要为高蜡原油；原油黏度集中在 5 ~ 20mm^2/s，65% 的原油黏度落在该区间；原油凝固点均小于 40℃，绝大多数在 20 ~ 40℃ 之间，占原油总数的 83%；原油含硫量较低，多数在 0.1% 以下，属低硫原油。综合来看，梨树断陷凝析油、轻质油、中质油和重质油均有分布，以中质油为主，原油物性具有密度低、黏度低、凝固点低、含硫量低和含蜡量高的“四低一高”的特征。

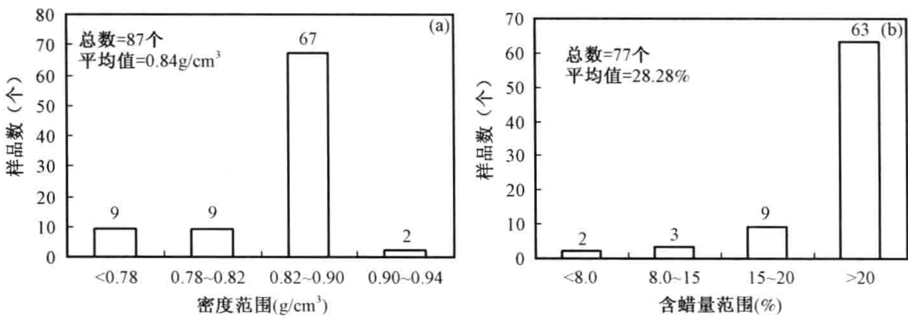


图 3 – 1　梨树断陷原油物性分布特征

图 3 – 2 为梨树断陷原油密度、含蜡量随深度变化关系图，从图上可以看出，梨树断陷原油密度在纵向上变化幅度并不大，主要分布在 0.82 ~ 0.9g/cm^3 之间，整体上具有随深度增大，密

度微弱减小的趋势，尤其当埋深大于2200m时，这种减小的趋势更为明显；原油的含蜡量随深度的增加并未表现出一定的规律性，但含蜡量普遍较高，绝大多数在10%以上。

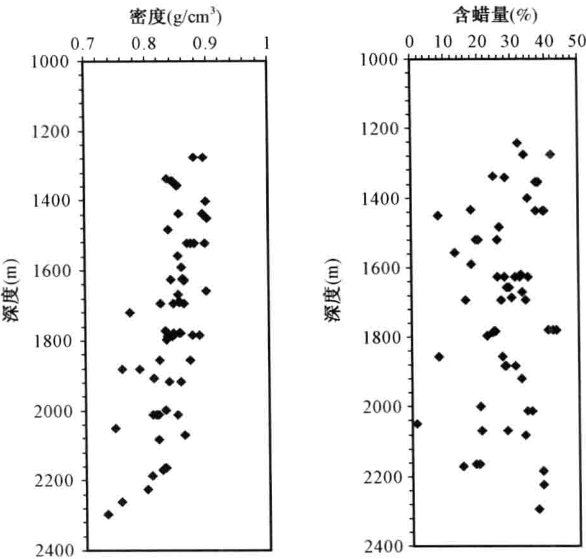


图3－2　梨树断陷原油物性随深度变化关系图

第二节　原油轻烃组成

原油中的“轻烃”，是指原油中呈溶解态与易挥发态的轻质烃类馏分，通常的碳数范围可包含 C_1—C_{15} 的烃类，由于在地面常温条件下，原油轻烃馏分中 C_1—C_4 气态烃分子结构简单，信息量少，而且非常容易挥发；所以原油轻烃馏分中应用较多的成分，主要是 C_5—C_7 烃类，从分子结构来看，主要是由正烷烃、支链烷烃（甲基烷烃、二甲基烷烃）环烷烃（环戊烷、环己烷）和芳香烃（苯、甲苯）所组成。

轻烃 C_7 系列化合物包括正庚烷（nC_7）、甲基环己烷（$MCyC_6$）和二甲基环戊烷（$DMCyC_5$），不同类型的 C_7 化合物往往有着不同的母质来源。戴金星（1993）、ten Haven（1997）等研究表明，甲基环己烷（$MCYC_6$）主要来自高等植物木质素、纤维素和醣类等，热力学性质相对稳定，是反映陆源母质类型的良好参数。各种结构的二甲基环戊烷（$DMCYC_5$）主要来自水生生物的类脂化合物，正庚烷（nC_7）主要来自藻类和细菌。从原油正庚烷、甲基环己烷与二甲基环戊烷相对含量组成三角图（图3－3）上可以看出，梨树断陷原油整体上以正庚烷和甲基环己烷为主，分别占8.19%～62.65%和4.44%～74.61%，二甲基环戊烷含量最低。戴金星（1993）运用甲基环己烷相对含量有效区分了油型气和煤型气，梨树断陷原油也具有上述差异性。八屋油田原油正庚烷占优势，绝大多数样品 nC_7 含量在50%以上，而 $MCyC_6$ 含量小于50%；相比较而言，在秦家屯油田，原油 nC_7 含量多数在40%以下，$MCyC_6$ 含量多数大于50%，与八屋油田原油相比，高等植物含量明显偏高，显示出腐殖型成因为主的特征；四五家子油田部分原油样品也具有类似的特征。总的来说，原油 C_7 轻烃组成反映出梨树断陷不同地区原油的生油母质可能存在一定的差异。

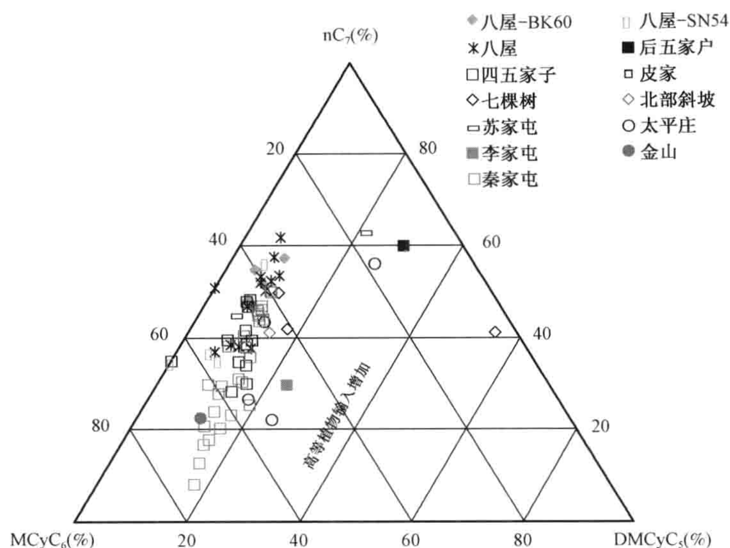


图 3-3 梨树断陷原油 C_7 轻烃内组成三角图

原油轻烃 2,4-二甲基戊烷(2,4-DMP)与 2,3-二甲基戊烷(2,3-DMP)比值可作为温度的函数,而不受时间和类型的影响,该值随原油成熟度的增加而减小。Mango(1997)提出了原油形成温度(℃)与 2,4-DMP/2,3-DMP 值的关系式:

$$T(℃) = 140 + 15[\ln(2,4-DMP/2,3-DMP)]$$

根据此公式计算出梨树断陷原油的形成温度范围在 118.1~133.7℃之间(3-1),其中八屋油田原油生成温度范围为 118.1~125.7℃;四五家子油田原油生成温度主体位于 119.4~124.7℃之间;秦家屯油田原油生成温度范围为 119.9~128.9℃;七棵树油田原油生成温度范围为 123.4~131.7℃;太平庄地区原油生成温度范围为 122.2~127.2℃(图 3-4),梨树断陷原油整体显示出成熟原油的特征。

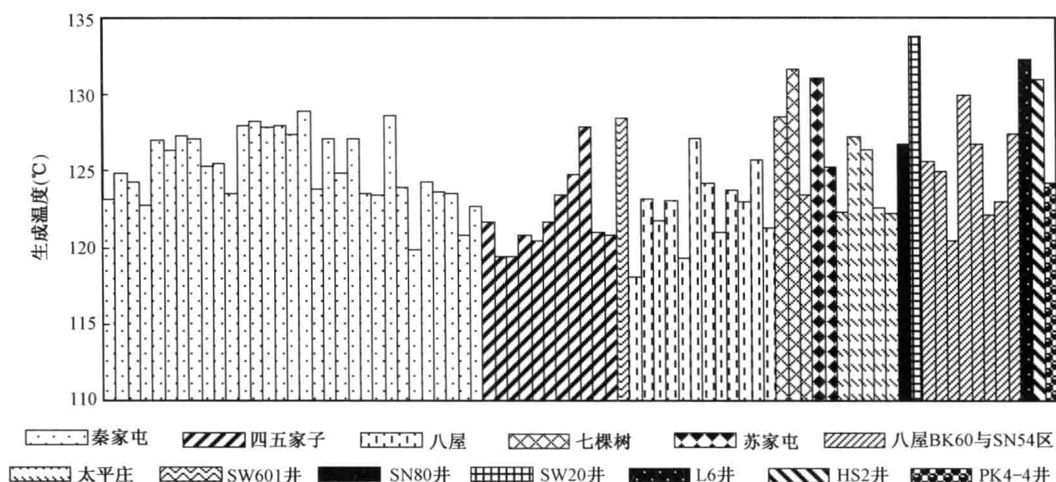


图 3-4 梨树断陷原油生成温度对比图

梨树断陷外围地区苏家屯 SW30 井火石岭组井和 L2 井营城组表现出较高的原油生成温度，分别为 131.0 和 125.2℃，金山地区 L6 井沙河子组原油生成温度为 132.3℃，李家屯 HS1 井沙河子组原油生成温度为 131.0℃，可见上述地区原油成熟度较高。

庚烷值与异庚烷值是用来反映原油热演化程度的轻烃指标，随着演化程度的加深，庚烷值与异庚烷值增大。Thompson(1983)提出庚烷值和异庚烷值并利用其良好的表征原油成熟度的变化。

图 3－5 为梨树断陷原油轻烃庚烷值和异庚烷值关系图，从图上可以看出，梨树断陷原油整体上显示出成熟原油的特征，庚烷值和异庚烷值呈正相关关系。八屋油田 BK60 和 SN54 区块原油两参数比值最高，表明该区原油成熟度要高于其他地区；而秦家屯和四五家子地区原油成熟度相对稍低。

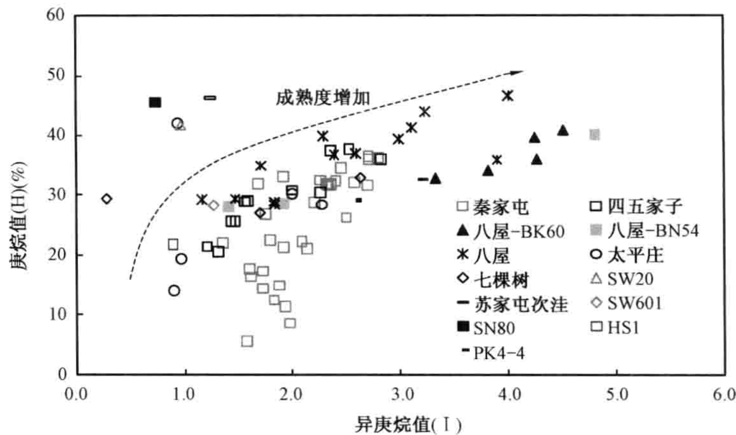


图 3－5　梨树断陷原油庚烷值与异庚烷值关系图

第三节　原油饱和烃地球化学特征

一、正构烷烃与类异戊二烯烷烃

从图 3－6 可知，梨树断陷原油色谱图特征各异，正构烷烃表现为五种分布模式：(1)以 SW30 井火石岭组原油为代表，正构烷烃呈单前峰型，主峰碳多为 nC_{11}—nC_{14}；(2)正构烷烃呈正态分布或微弱双峰前峰型，八屋和后五家户地区原油呈单峰型，梨树断陷绝大多数原油正构烷烃表现为这种分布模式，如 BK60－2 井营Ⅲ段和 SN80 井登娄库组原油；秦家屯和四五家子地区原油多为双峰型，如 QK1－2 泉Ⅱ段原油与 W20－5 井泉Ⅱ段原油；(3)以 PK4－4 井营Ⅴ段原油为代表的后峰单峰型，nC_{23} 和 nC_{25} 具有一定奇偶优势；(4)凝析油分布模式，低碳数 nC_7、nC_8 和 nC_9 含量最高，随碳数升高正构烷烃含量呈平滑曲线依次减低；(5)气藏反凝析成油模式，以 L6 井为典型代表，主要化合物为轻烃组分，nC_9 以上正构烷烃缺失。

梨树断陷各区块原油正构烷烃各不相同，八屋地区原油正构烷烃 CPI 和 OEP 值变化不大，分别为 1.05～1.23 和 1.05～1.11，轻重比 C_{21-}/nC_{22+} 为 1.01～2.11；四五家子地区原油 CPI 为 1.13～1.36，OEP 为 1.05～1.13，nC_{21-}/nC_{22+} 范围为 1.25～1.81；七棵树油田原油 CPI

为 1.12 ~ 1.27，OEP 为 1.10 ~ 1.18，nC_{21-}/nC_{22+}范围为 1.64 ~ 1.89；秦家屯油田原油 CPI 为 1.08 ~ 1.35，OEP 为 1.06 ~ 1.17，nC_{21-}/nC_{22+}范围是 1.12 ~ 1.75；太平庄油田原油 CPI 为 1.03 ~ 1.55，OEP 为 0.98 ~ 1.14，nC_{21-}/nC_{22+}范围介于 1.27 ~ 2.13 之间；皮家地区 PK4 - 4 井原油 CPI 为 1.12，OEP 为 1.07，nC_{21-}/nC_{22+}范围为 0.85；苏家屯地区 SW30 井和 L2 井原油 CPI 分别为 1.05 和 1.09，nC_{21-}/nC_{22+}值差别较大，分别为 2.42 和 5.76；李家屯地区 HS1 和 HS2 井原油 CPI 分别为 1.12 和 1.17，OEP 分别为 0.98 和 1.11，nC_{21-}/nC_{22+}分别为 2.64 和 1.55；后五家户地区 SN80 井 CPI 值为 1.17，OEP 为 1.04，nC_{21-}/nC_{22+}为 3.58；北部斜坡的 SW601 井 CPI 值 1.13，OEP 为 0.94，nC_{21-}/nC_{22+}为 2.13；双龙地区 SW20 井 CPI 值为 1.11，OEP 值为 1.05，nC_{21-}/nC_{22+}为 1.37。总体来看，秦家屯地区原油 CPI 值较高，可能揭示高等植物生源；nC_{21-}/nC_{22+}的高值则主要在苏家屯 SW30 和 L2 井、后五家户 SN80 井、北部斜坡 SW601 井和李家屯 HS1 井等，可能表征水生生物贡献较大。

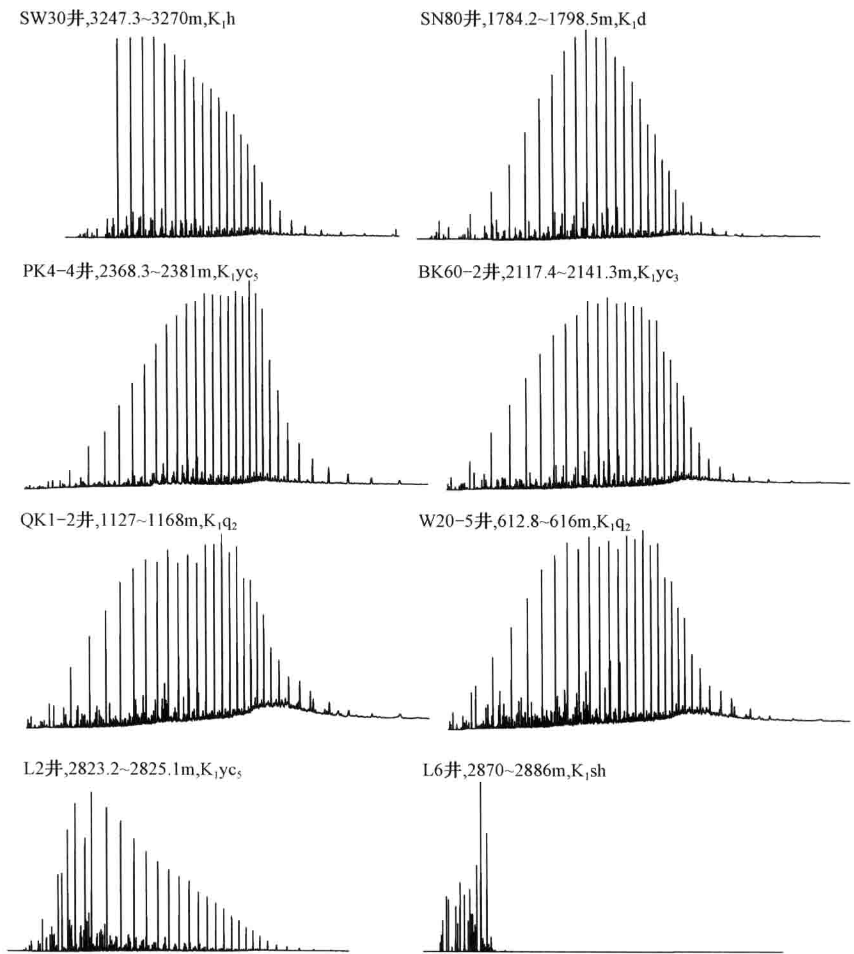


图 3 - 6　梨树断陷原油色谱图

由图 3 - 7 可以看出，梨树断陷原油 Pr/Ph 值范围是 0.86 ~ 1.55，秦家屯油田原油和八屋 SN54 区块原油 Pr/Ph 值较其他区块原油高，Pr/Ph 值大于 1.30；八屋 BK60 区块和四五家子地区原油 Pr/Ph 值范围为 0.95 ~ 1.15，其中八屋 BK60 区块原油的 Pr/Ph 值低于八屋 SN54 区块

和其他区块原油。外围地区李家屯 HS1 井和 HS2 井原油 Pr/Ph 值分别为 1.34 和 1.29；皮家 PK4－4 井原油 Pr/Ph 值为 0.92；双龙 SW20 井原油 Pr/Ph 值为 1.34；苏家屯 SW30 井和 L2 井原油 Pr/Ph 值分别为 0.87 和 1.27；后五家户 SN80 原油 Pr/Ph 值为 0.86。总体而言，梨树断陷原油 Pr/Ph 差异不大，总体上反映偏还原的沉积环境。

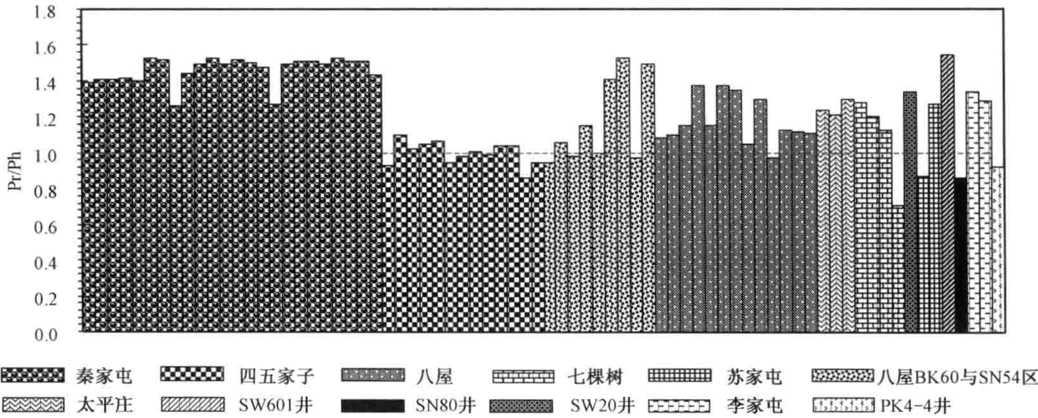


图 3－7 梨树断陷原油 Pr/Ph 分布图

通常来说，原油的 Pr/nC_{17} 和 Ph/nC_{18} 比值随着成熟度的增高而降低。图 3－8 中，Pr/nC_{17} 与 Ph/nC_{18} 相关性好，但不同区块原油两比值分布不尽相同，说明原油成熟度存在差异。苏家屯、皮家和八屋地区原油两比值低于其他区块原油，表明该区成熟度高于其他区块；而同一区块不同层段两比值也存在差异，如四五家子地区，泉Ⅱ段原油 Ph/nC_{18} 范围为 0.42～0.51，Pr/nC_{17} 介于 0.35～0.46 之间，明显高于其他原油样品，表明泉Ⅱ段原油成熟度低于其他原油样品；八屋地区 BK60 区块和 SN54 区块原油两比值均低于八屋地区其他区块原油，说明同一油田不同区块原油成熟度也存在差异。总的来看，八屋地区 BK60 区块和 SN54 区块、皮家地区以及七棵树油田 SW11 井原油成熟度明显高于其他区块。

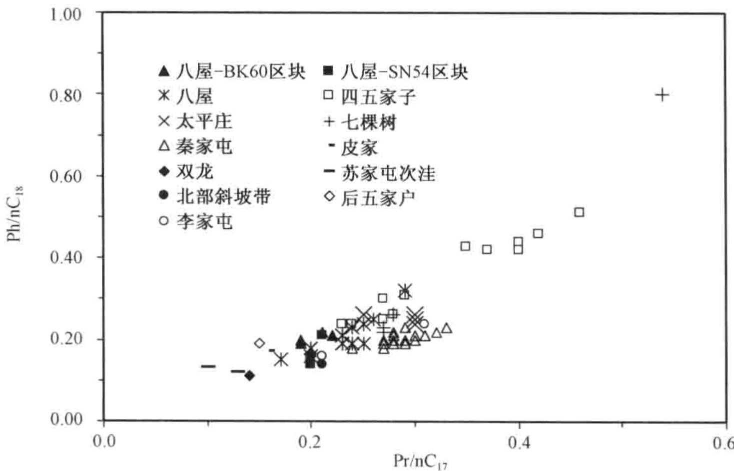


图 3－8 梨树断陷原油 Pr/nC_{17} 和 Ph/nC_{18} 关系图

二、萜烷化合物

(一)补身烷系列

在梨树断陷原油中都检出了含量较高的 C_{14}—C_{16} 补身烷系列化合物。不同区块原油中该系列化合物分布形式有较大的变化。图3-9是原油 m/z 123 质量色谱图,从图上可以看出,秦家屯油田和四五家子原油补身烷系列分布较为相近,C_{15} 补身烷含量最高,重排补身烷和 8β(H)-升补身烷含量相对较低,重排补身烷/8β(H)-升补身烷比值介于0.92~2.39之间,三者多呈倒“V”字形;八屋油田原油补身烷系列的分布大体上可分为3种:(1)以营Ⅲ段原油为主,其重排补身烷含量最高,其次是补身烷,8β(H)-升补身烷含量最低,重排补身烷/8β(H)-升补身烷比值一般大于3,补身烷/8β(H)-升补身烷比值大于2,三者分布呈梯形;(2)以营Ⅴ段原油为主,虽然三者在分布上与营Ⅲ段原油相似,但补身烷和 8β(H)-升补身烷含量均有所增加,重排补身烷/8β(H)-升补身烷比值和补身烷/8β(H)-升补身烷比值均介于1~2之间;(3)以营Ⅰ段原油为主,其分布模式与秦家屯和四五家子油田原油相近,暗示其可能具有相似的成因。太平庄油田SN119井与秦家屯和四五家子油田原油补身烷分布模式较为相似,而七棵树油田TG1井和SW8井则与八屋油田营Ⅴ段原油补身烷分布模式相似。

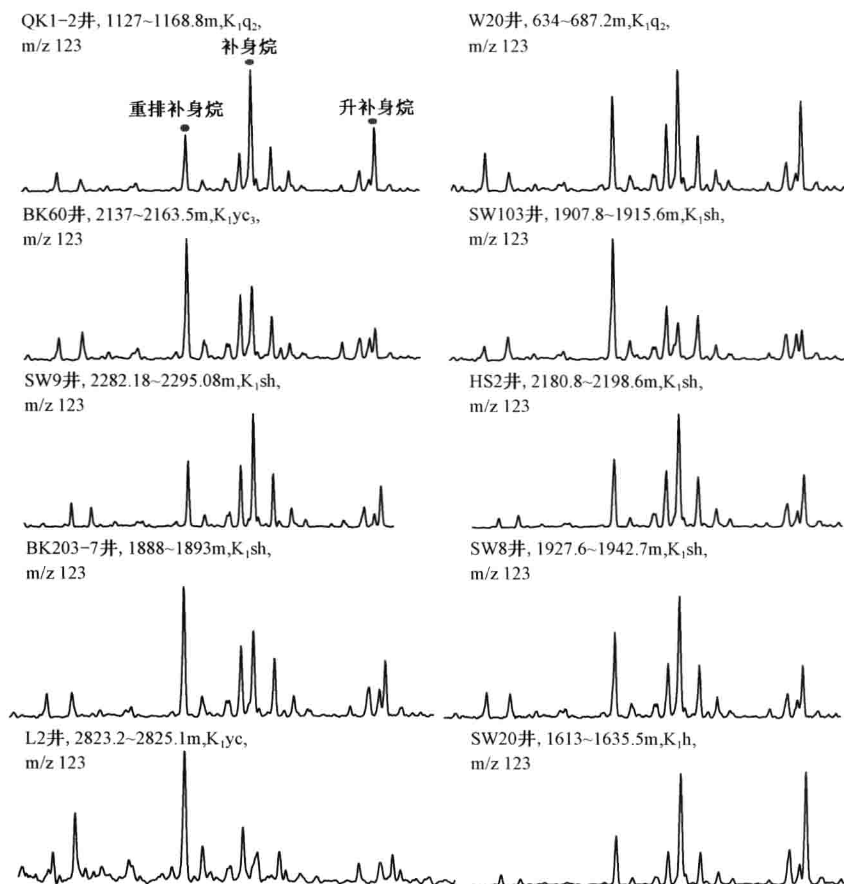


图3-9 梨树断陷原油补身烷系列化合物分布图

一般来说,重排补身烷含量与成熟度有着密切联系,二者呈正相关关系。图 3 - 10 中,八屋油田 BK60 区块和 SN54 区块、皮家油田 PK4 - 4 井以及七棵树油田 SW11 井原油两比值明显高于其他区块原油,表明这些区块原油的成熟度要高于其他区块原油。

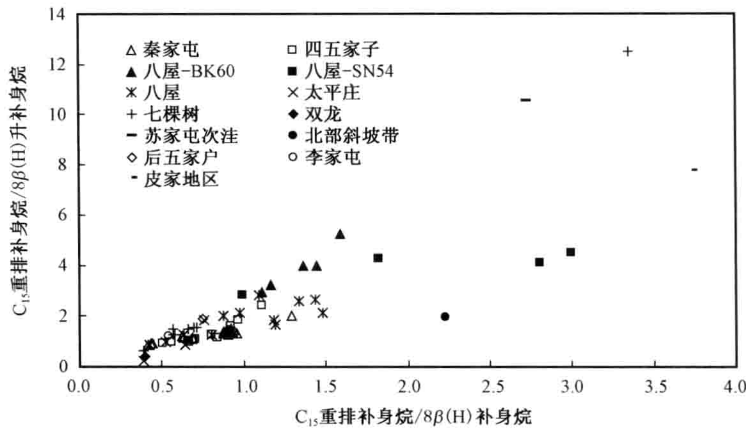


图 3 - 10 梨树断陷原油重排补身烷/8β(H) - 补身烷与重排补身烷/8β(H) - 升补身烷关系图

(二)三环萜烷与四环萜烷

绝大多数原油三环萜烷系列化合物组成呈现以 C_{23} 为主峰的正态分布的分布特征(图 3 - 11),而八屋油田部分原油三环萜烷系列则呈现出 C_{19}—C_{26} 阶梯状依次降低,如 SW1 井营Ⅲ段、SW103 井和 SW103 - 12 - 2 井的营Ⅴ段原油样品,皮家油田 PK4 - 4 井原油三环萜烷分布呈锯齿状。各区块原油 C_{24} 四环二萜含量存在差异,其中秦家屯油田原油 C_{24} 四环二萜/C_{26} 三环萜烷比值较高,主体介于 0.4 ~ 0.5 之间,八屋油田的则最低,比值为 0.1 ~ 0.41,主体范围为 0.1 ~ 0.3。此外,绝大多数原油样品 C_{26} + 长链三环萜烷系列丰度较高,显示出一种"翘尾巴"的分布形式。一般而言,湖相原油中的三环萜烷系列呈现正态分布,而煤成油中三环萜烷系列则呈现出 C_{19}—C_{26} 阶梯状依次降低。研究区绝大多数原油表现出了湖相油三环萜烷的分布模式,而其中的 C_{26} + 长链三环萜烷一般指示了低等生物藻类的贡献,原油高含量的 C_{26} + 长链三环萜烷表明了成油母质可能主要以浮游植物藻类为主。

定量分析结果表明,三环萜烷系列化合物在绝对浓度上也存在一定的差异。秦家屯油田原油三环萜烷化合物浓度分布范围是 1.08 ~ 4.36μg/mg,四五家子油田原油三环萜烷化合物浓度介于 1.19 ~ 3.31μg/mg 之间,八屋油田原油三环萜烷化合物浓度范围为 0.74 ~ 4.03 μg/mg。一般来说,三环萜烷系列化合物可能来源于菌藻类低等生物的贡献,也可能由藿烷系列化合物转化而来。从成熟度角度来说,随成熟度增加,藿烷逐渐向三环萜烷转变,使得三环萜烷浓度增大。八屋油田 BK60 区块、SN54 区块以及七棵树油田原油三环萜烷/藿烷高于其他区块原油,尤其是 SW11 井原油以三环萜烷为主。另外外围苏家屯梨 2 井、后五家户 SN80 井、李家屯 HS2 井和皮家 PK4 - 4 井原油也显示出较高的三环萜烷/藿烷比值,而上述这几个区块原油成熟度明显高于其他区块,表明本次研究中成熟度对三环萜烷的分布起着明显的控制作用。

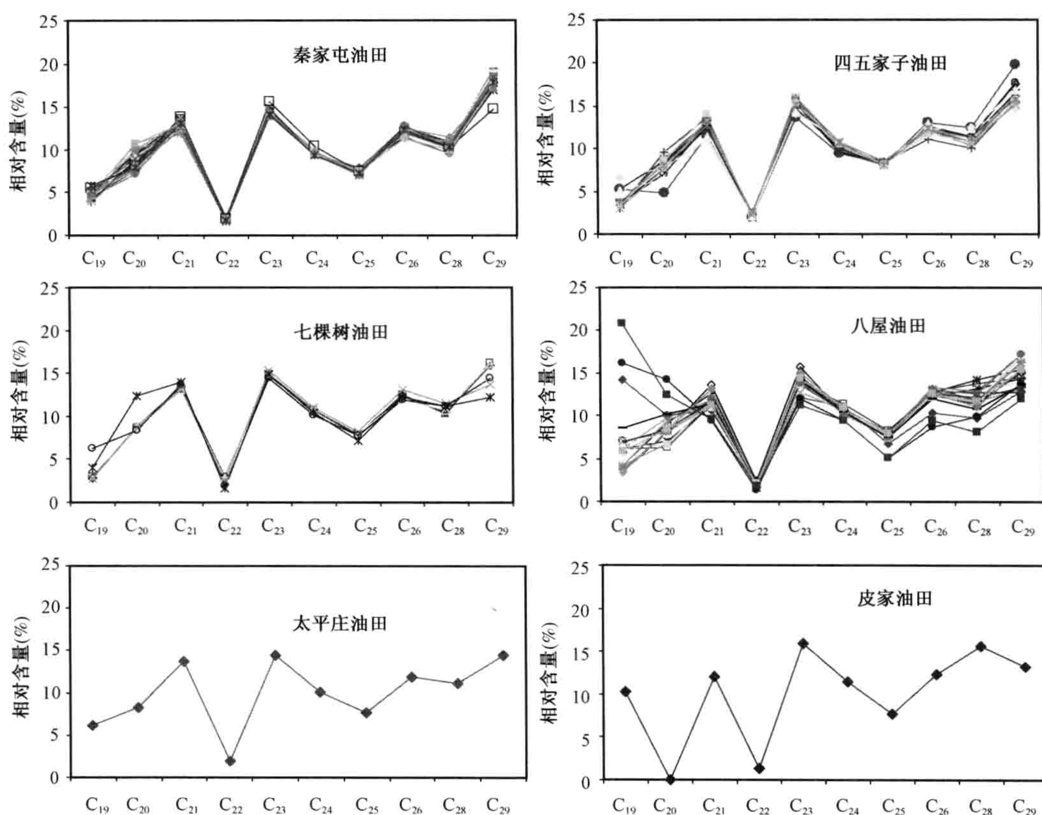


图 3－11　梨树断陷不同油田原油三环萜烷系列相对含量分布图

（三）五环三萜类化合物

图 3－12 为梨树断陷部分原油 m/z 191 质量色谱图，从图上可以看出，原油藿烷系列化合物分布完整，都检出 C_{27}—C_{35}藿烷系列化合物，C_{30}藿烷占绝对优势，C_{31}—C_{35}升藿烷呈递减分布，而皮家油田 PK4－4 井原油样品则并未检测出升藿烷。不同区块原油藿烷系列化合物分布存在差异，同一地区不同层位原油藿烷系列分布也不尽相同。秦家屯油田泉Ⅱ段、登娄库组和沙河子组原油藿烷分布较为一致，C_{30}藿烷占绝对优势，伽马蜡烷丰度中等，C_{29}降藿烷含量较高，C_{29}Ts、C_{30}重排藿烷丰度低，表明这一区块的原油物性、化学性质相同，同源性特征非常明显；四五家子油田泉Ⅱ段和营Ⅴ段原油藿烷系列分布与秦家屯原油极为相似，说明其可能具有相同的成因；八屋油田原油藿烷系列分布与秦家屯原油有所不同，表现为 C_{29}降藿烷含量低，C_{29}Ts、C_{30}重排藿烷含量较高和较高的伽马蜡烷丰度，且不同层位其含量也有差别，总体上营Ⅲ段高于营Ⅴ段；太平庄原油样品藿烷系列分布特征与秦家屯原油相似；七棵树油田 TG1 井原油藿烷系列分布模式与八屋油田营Ⅴ段原油相似，表明其成因类型可能相同。

伽马蜡烷来源于原生动物的四膜虫醇，其含量的高低可以很好的指示水体盐度或分层现象（Peters 和 Moldowan，1993）。梨树断陷各区块原油伽马蜡烷含量普遍较高，其中秦家屯油田和四五家子油田原油伽马蜡烷/C_{30}藿烷比值较为接近，范围在 0.29～0.44 之间，指示烃源岩形成于微咸水沉积环境；八屋油田原油伽马蜡烷/C_{30}藿烷比值范围是 0.34～1.10，明显高于秦家屯和四五家子油田原油，表明其来源于微咸水—咸水的沉积环境，其中八屋油田 BK60 区块原油伽马蜡烷/C_{30}藿烷最大。

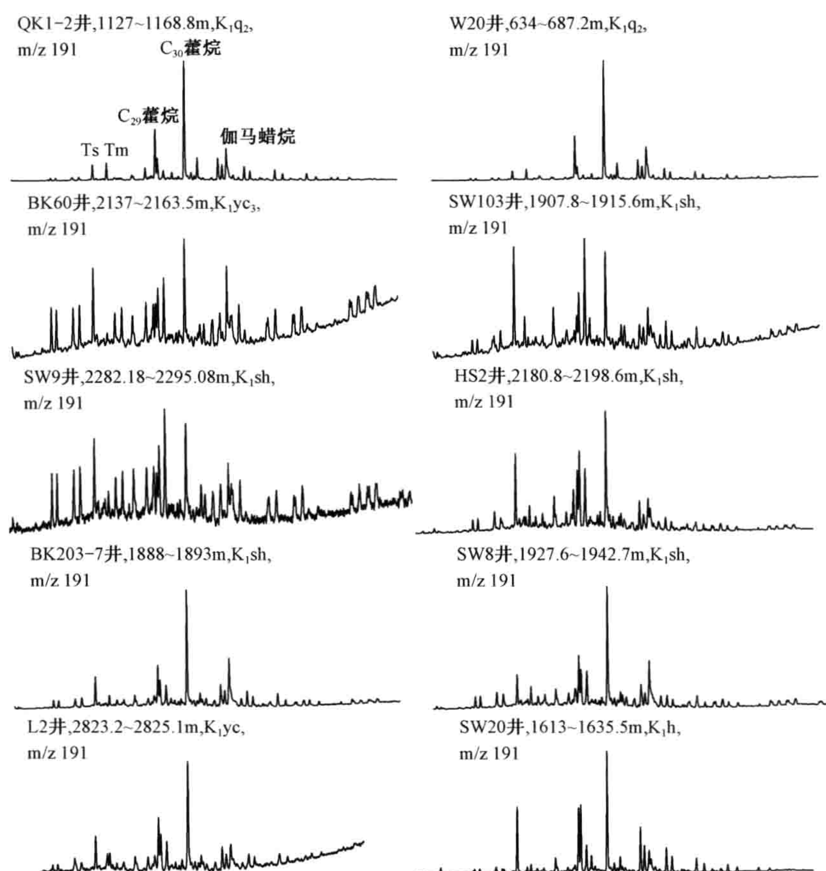


图 3－12　梨树断陷原油五环三萜类化合物分布图

梨树断陷原油的一个明显特征就是 C_{29}Ts 和 C_{30}重排藿烷的分布,研究表明这类化合物的含量具有相似的成因,一般认为,C_{29}Ts 及 C_{30}重排藿烷起源于含有黏土并沉积在弱氧化—氧化环境的沉积物,含量高指示着弱还原—弱氧化条件下黏土矿物的催化作用。图 3－13 为梨树断陷原油 C_{29}Ts/C_{29}降藿烷与 C_{30}重排/C_{30}藿烷分布图,可以看出,秦家屯油田和四五家子油田原油 C_{30}重排/C_{30}藿烷比值较小,介于 0.04～0.19 之间,C_{29}Ts/C_{29}降藿烷介于 0.31～0.76 之间,八屋油田原油两比值较高,分别介于 0.12～1.21 和 0.54～2.1 之间,BK60 区块和 SN54 区块原油的比值高于八屋其他区块;七棵树油田 TG1 井和 SW8 井原油样品两参数值较高,且较为接近,暗示其具有相似的成因;皮家油田 PK4－4 井营Ⅴ段原油、七棵树 SW9 井和 SW11 井沙河子组原油 C_{29}Ts/C_{29}降藿烷和 C_{30}重排/C_{30}藿烷值均较高,达 1.56～2.89,其可能与八屋油田 BK60 和 SN54 区块原油具有相同的成因;李家屯 HS2 井沙河子组原油表现出较高的 C_{29}Ts 和 C_{30}重排藿烷含量,明显落入八屋油田 BK60 和 SN54 区块原油分布区;后五家户 SN80 井登娄库组原油与双龙地区 SW20 井火石岭组原油明显与八屋原油较为接近。因此,C_{29}Ts/C_{29}降藿烷和 C_{30}重排/C_{30}藿烷比值揭示秦家屯原油与四五家子原油的烃源岩沉积环境和母源具有相似性,而与八屋油田 BK60、SN54 区块原油、皮家油田以及李家屯地区原油具有明显的差异性。

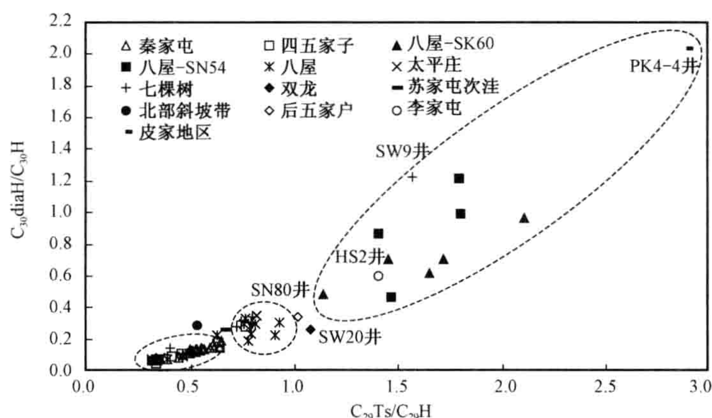


图 3 - 13　梨树断陷不同类型原油 C_{29}Ts/C_{29}H 与 C_{30}diaH/C_{30}H 相关图

在烃源岩地球化学特征中，Ts/Tm 的分布与 C_{29}Ts 和 C_{30}重排藿烷含量具有一致性，原油中也表现出一样的特征。C_{27}重排甾烷也表现出与重排藿烷一致的分布特征。图 3 - 14 和图 3 - 15为 Ts/Tm 和 C_{27}重排/C_{27}规则甾烷与 C_{29}Ts/C_{29}降藿烷的分布图，从两图中可以看出，八屋 BK60 和 SN54 区块原油、皮家原油、七棵树 SW9 井与 SW11 井原油和李家屯原油为同一类型原油；秦家屯和四五家子原油为另一类原油，七棵树、太平庄、苏家屯、后五家户和双龙地区原油为最后一类，上述化合物分布介于前两者之间。

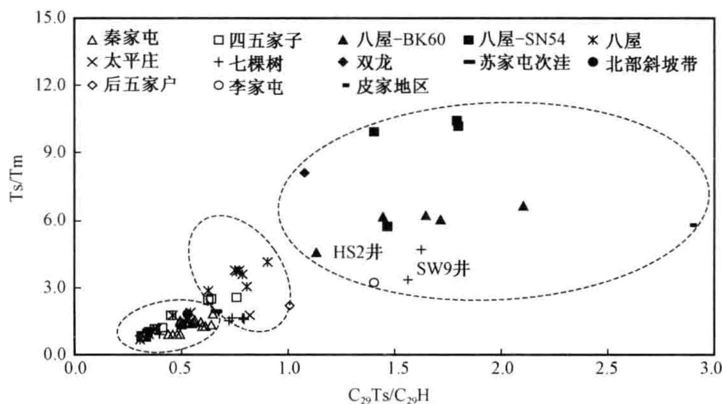


图 3 - 14　梨树断陷不同类型原油 C_{29}Ts/C_{29}H 与 Ts/Tm 相关图

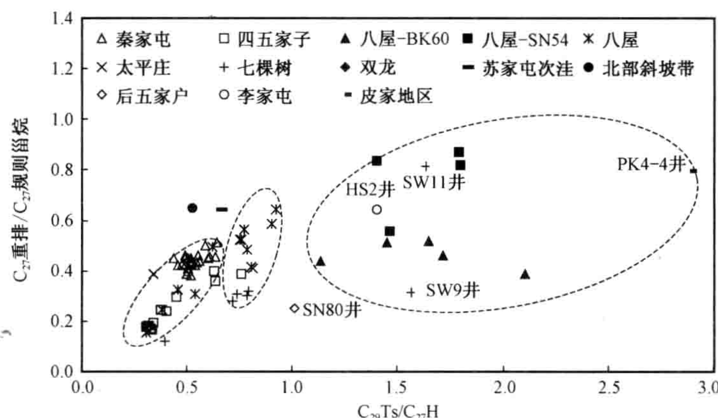


图 3 - 15　梨树断陷不同类型原油 C_{29}Ts/C_{29}H 与 C_{27}重排/C_{27}规则甾烷相关图

三、甾烷化合物

甾烷是广泛分布于真核生物细胞壁中的甾醇、甾酮以及甾酸等前身经过成岩作用形成的且具有四个环的化合物，在动、植物界含量都比较丰富，它是一类实用性较强的生物标志物，包括孕甾烷、C_{27}—C_{29}重排甾烷和规则甾烷，该类化合物可以提供有关有机质来源和成熟度等方面的信息。在甾烷系列化合物分布上，梨树断陷不同区块原油呈现出以富含规则甾烷为主的特征。如图3－16所示，规则甾烷的分布特征大体可分为2类，第一类以秦家屯和四五家子油田为代表，其$C_{27}\alpha\alpha\alpha R$、$C_{28}\alpha\alpha\alpha R$和$C_{29}\alpha\alpha\alpha R$相对组成分布呈不对称“V”字形，$C_{27}\alpha\alpha\alpha R$峰略

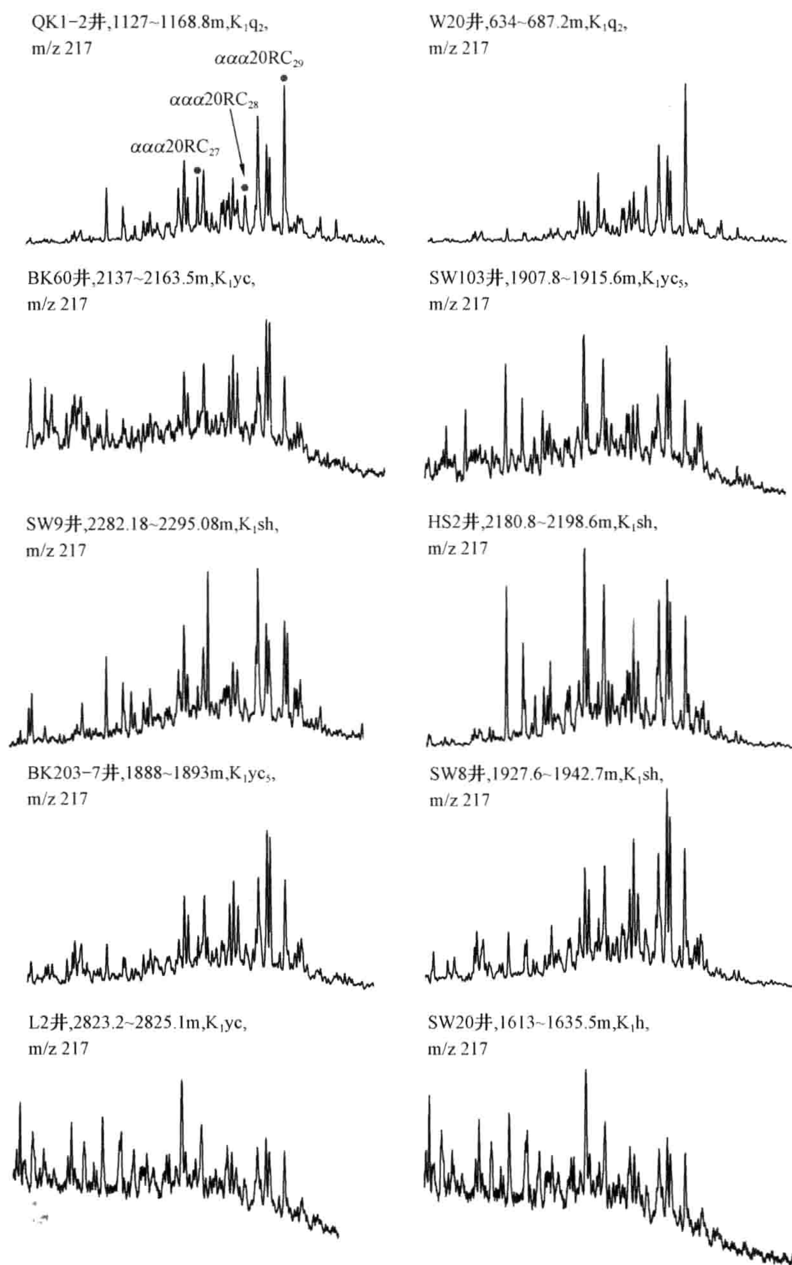


图3－16 梨树断陷典型原油甾烷化合物分布图

低于 $C_{29}\alpha\alpha\alpha R$，$C_{29}\beta\beta$ 构型甾烷含量低；第二类以八屋油田 BK60 区块段原油为代表，$C_{27}\alpha\alpha\alpha R$、$C_{28}\alpha\alpha\alpha R$ 和 $C_{29}\alpha\alpha\alpha R$ 相对组成分布呈不对称“V”字形，$C_{27}\alpha\alpha\alpha R$ 峰略低于 $C_{29}\alpha\alpha\alpha R$，但 $C_{29}\beta\beta$ 构型甾烷含量较高。

甾烷中 $C_{27}\alpha\alpha\alpha R$、$C_{28}\alpha\alpha\alpha R$ 和 $C_{29}\alpha\alpha\alpha R$ 规则甾烷的分布可以很好的确定原油的母质类型。梨树断陷原油 $C_{27}\alpha\alpha\alpha R$、$C_{28}\alpha\alpha\alpha R$ 和 $C_{29}\alpha\alpha\alpha R$ 含量较为接近，$C_{27}\alpha\alpha\alpha R$ 甾烷分布在 10.02 ~ 28.97% 之间，平均为 18.33%，$C_{28}\alpha\alpha\alpha R$ 甾烷介于 13.86 ~ 39.97% 之间，$C_{29}\alpha\alpha\alpha R$ 甾烷含量为 50.29 ~ 63.44%，平均为 56.87%，所有原油样品均显示出 $C_{29}\alpha\alpha\alpha R$ 甾烷优势。如图 3 - 17 所示，各区块原油样品点分布都较为集中，表明成油母质类型可能并没有太大的差别，整体显示出高等陆生植物对有机质输入的贡献。但据研究成果，众多学者已发现许多古生界和更老时代的原油以及一些碳酸盐岩来源的原油就含有丰富的 C_{29} 甾烷，它们的烃源岩没有或很少有高等植物的输入，因此，原油中丰富的 C_{29} 甾烷还归因于浮游植物藻类的贡献。结合本区大多数原油具有低 Pr/Ph 比值（$Pr/Ph < 1.5$）的特征，可以推测原油的母质可能也有大量藻类和细菌输入的贡献。

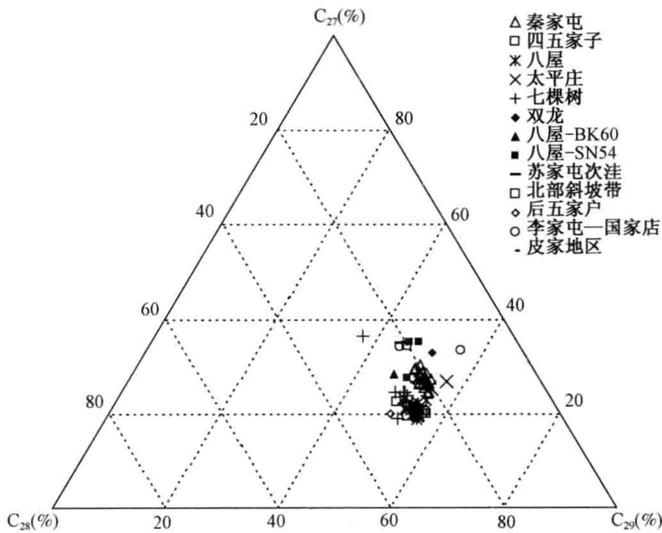


图 3 - 17　梨树断陷原油 C_{27}—C_{28}—$C_{29}\alpha\alpha\alpha$（R）甾烷分布三角图

除规则甾烷外，重排甾烷也是甾烷系列化合物的重要组成部分。研究表明，重排甾烷的发育除与成熟度有关外，其成因与重排藿烷类似，与烃源岩中的黏土含量及酸、碱性密切相关，因为酸的催化作用和烃源岩沉积环境的氧化性是甾烷向重排甾烷转化的必备条件。图 3 - 18 是梨树断陷原油 C_{27} 重排/C_{27} 规则甾烷与 $C_{29}\alpha\alpha\alpha$ - 20S/（20S + 20R）关系图，从图中可以看出，原油 C_{27} 重排/C_{27} 规则甾烷与 C_{29} - $\alpha\alpha\alpha$20S/（20S + 20R）表现出很好的同步性，但不同区块原油原油 C_{27} 重排/C_{27} 规则甾烷含量明显不同，四五家子油田原油原油 C_{27} 重排/C_{27} 规则甾烷介于 0.15 ~ 0.25 之间，明显低于其他区块原油。秦家屯油田和四五家子油田相似，但四五家子油田原油成熟度低于其他区块原油，因此，梨树断陷原油重排甾烷的含量可能主要受成熟度控制。另外，皮家油田 PK4 - 4 井 C_{27} 重排/C_{27} 规则甾烷较高，达 0.80，可能与其他影响因素有关，而并非成熟度因素控制。

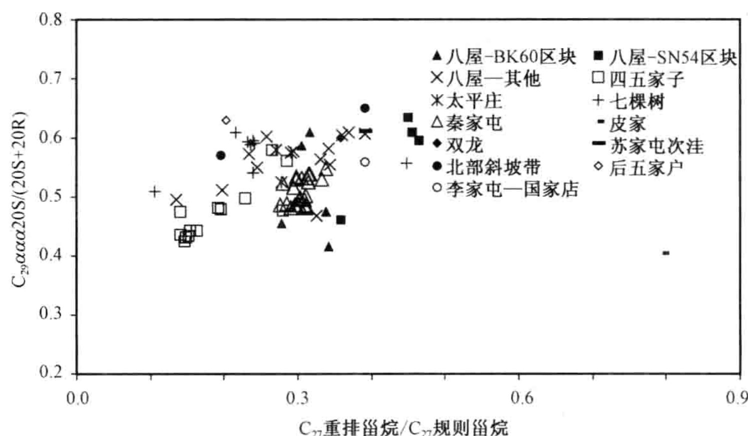


图 3－18　梨树断陷原油 $C_{29}\alpha\alpha\alpha20S/(20S+20R)$ 与 C_{27} 重排/C_{27} 规则甾烷分布图

C_{29} 甾烷 $\alpha\beta\beta/(\alpha\beta\beta+\alpha\alpha\alpha)$ 和 C_{29} 甾烷 20S/(20S＋20R)可以很好的表征原油的成熟度(Peters 和 Moldowan,1993)。图 3－19 是梨树断陷原油甾烷成熟度参数相关图,从图上可以看出,绝大多数原油样品两比值变化表现出很好的同步性,且不同区块原油均显示出成熟原油的性质,相比而言,四五家子油田原油成熟度略低一些,其中泉Ⅱ段原油处于低熟与成熟交接区域,成熟度明显低于营Ⅴ段原油;八屋油田原油成熟度明显相对较高,其中 BK60 和 SN54 区块成熟度最高;苏家屯次洼 L2 井、后五家户 SN80 井、李家屯 HS2 井等原油成熟度也较高,与八屋原油相似,处于成熟阶段;双龙地区 SW20 井原油成熟度也稍低,为成熟原油。但八屋油田 BK60 区块和皮家地区的部分样品两比值变化并未显现出很好的一致性,这类原油显示出较高的 $C_{29}-\alpha\beta\beta/(\alpha\beta\beta+\alpha\alpha\alpha)$,而 C_{29}－20S/(20S＋20R)比值则与其他原油较为接近。一般来说,随热演化程度的增加,$\alpha\alpha$ 构型甾烷逐渐向 $\beta\beta$ 构型转化,导致该值逐渐增大,而出现八屋油田 BK60 区块、皮家油田和七棵树部分原油样品 $C_{29}-\alpha\beta\beta/(\alpha\beta\beta+\alpha\alpha\alpha)$ 与 C_{29}－20S/(20S＋20R)变化明显不同步的现象,从成熟度的角度可能并不能完全解释。有研究表明,长距离的运移也会使得原油中更富集 $\beta\beta$ 构型甾烷,即 C_{29} 甾烷 $\alpha\beta\beta/(\alpha\beta\beta+\alpha\alpha\alpha)$ 比值增大,因此,八屋油田 BK60 区块、皮家油田和七棵树部分原油样品高的 $C_{29}-\alpha\beta\beta/(\alpha\beta\beta+\alpha\alpha\alpha)$ 值可能与原油的长距离运移有关。

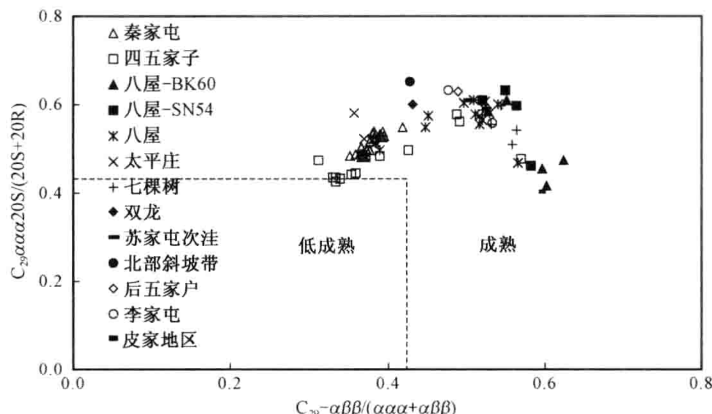


图 3－19　梨树断陷原油甾烷 $C_{29}-\alpha\beta\beta(\alpha\beta\beta+\alpha\alpha\alpha)$ 和 $C_{29}\alpha\alpha\alpha$－20S/(20S＋20R)变化图

第四节　芳香烃特征

一、芳香烃宏观组成

梨树断陷原油芳香烃中检出了萘系列、菲系列、联苯系列、芴系列、二苯并噻吩系列和二苯并呋喃系列等化合物，且以二环、三环为主（图3-20），同时还检出了荧蒽、芘等典型的高等植物输入标志的芳香烃类化合物，反映出梨树断陷原油的母源中有高等植物的贡献。芳香烃中，萘系列含量最高，分布在35.9%~60.49%之间，平均为50.42%；其次是菲系列化合物，相对含量介于21.9%~31.39%之间，平均为25.38%；联苯系列含量较低，为3.11%~18.78%，平均为9.03%。可见，梨树断陷原油具有高萘、高菲和高联苯的特征，说明原油的生油母质很可能为混合型。

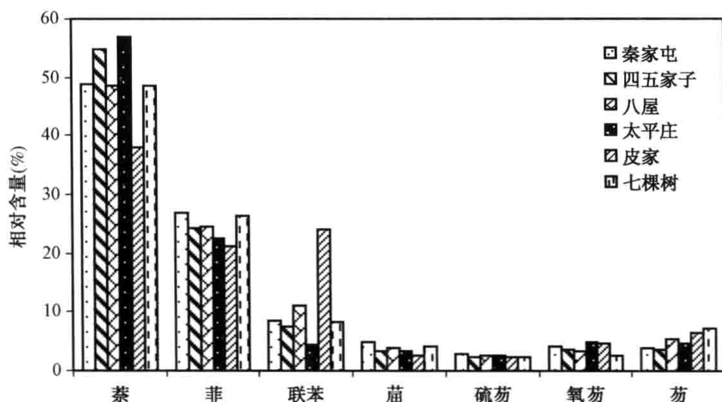


图3-20　梨树断陷原油芳香烃组分相对含量直方图

二、芳香烃系列内组成

芳香烃中含氮、氧、硫的二苯并噻吩系列（硫芴-SF）、二苯并呋喃系列（氧芴-OF）和芴（F）可能来源于同种先质，其基本骨架中都有一个五元环。在海相、盐湖相强还原条件下，芴分子骨架中很容易加入硫，而形成硫芴；在浅水如沼泽环境中游离氧比较丰富，从而容易形成氧芴。硫芴和氧芴的分布主要受控于烃源岩的沉积环境，在氧化—弱还原环境中，氧芴含量相对较高，强还原条件中硫芴则可能占优势，在正常还原环境下，芴系列化合物较丰富。

梨树断陷原油样品的三芴系列化合物中芴的含量最高，占三芴系列含量的25.7%~77.89%，氧芴含量占15.78%~42.58%，硫芴占13.6%~32.57%。从图3-21中可以看出，梨树断陷原油总体上表现出低硫芴、高氧芴和芴的特征，但不同地区原油三芴系列分布存在一定的差异，秦家屯油田、四五家子油田和太平庄油田原油氧芴含量最高，其次是芴，反映出其烃源岩形成于弱氧化—弱还原的沉积环境；七棵树油田、八屋油田和皮家油田则表现为芴含量高于氧芴的特征，表明其烃源岩形成于相对较还原的沉积环境，三芴系列化合物的分布所反映出的沉积环境与Pr/Ph所得结论是一致的。

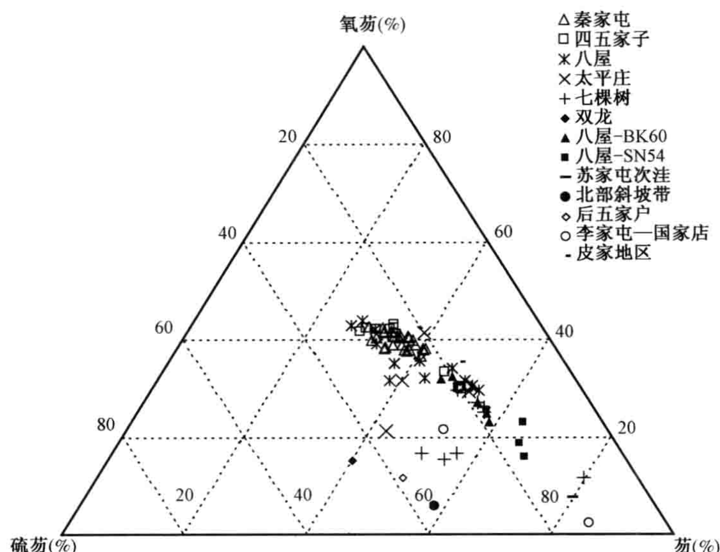


图3-21　梨树断陷原油三芴系列化合物组成三角图

研究表明,三甲基萘指数(TMNr)和四甲基萘指数(TeMNr)的关系能反映低—高成熟阶段原油和烃源岩的成熟度(van Aarssen 等,1999;陈致林,1997;李美俊等,2005)。秦家屯油田原油的三甲基萘指数范围为0.36~0.52,四甲基萘指数范围为0.37~0.52,四五家子油田原油两指数范围分别为0.27~0.62和0.41~0.8,八屋油田原油两参数值范围分别为0.19~0.83和0.33~0.86,太平庄原油两值分别为0.32和0.36,皮家油田PK4-4井原油两个萘指数分别为0.83和0.84,七棵树油田原油两比值范围分别为0.78~0.97和0.79~0.92从烷基萘指数判断梨树断陷原油基本已达到成熟阶段(图3-22),其中七棵树油田、八屋油田和皮家油田原油成熟度明显高于其他区块。

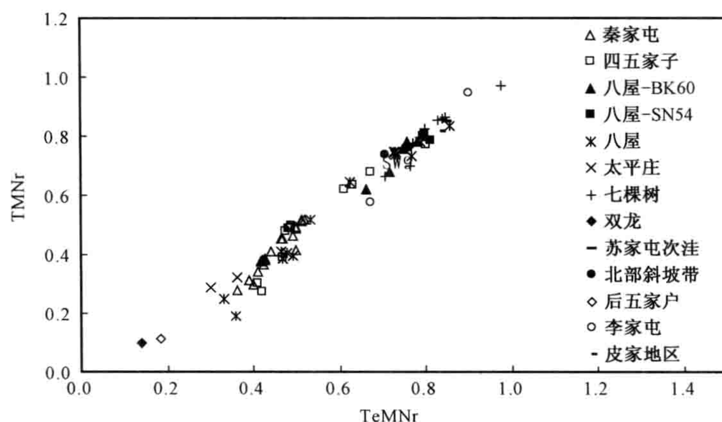


图3-22　梨树断陷原油芳香烃TMNr与TeMNr成熟度参数变化图

第五节　原油成因分类

根据梨树断陷原油轻烃、饱和烃生物标志物以及芳香烃组成及相关参数的分布特征，将梨树断陷原油划分为两种成因、三种类型的原油。

一、原油成因类型

（一）第Ⅰ类原油

第一类原油主要为黑色，如图3-23所示，梨树断陷Ⅰ类原油补身烷含量高，重排补身烷、补身烷和升补身烷呈倒“V”字形分布，重排补身烷/补身烷比值介于0.41～1.29之间，平均值为0.79；三环萜烷/五环三萜烷比值较低，为0.07～0.42，平均值为0.13，C_{24}四环二萜/C_{26}三环萜比值较高，分布于0.23～0.65之间，平均值为0.41，C28三环萜烷和C_{29}三环萜烷含量低或不含；规则甾烷C_{27}、C_{28}、C_{29}呈不对称“V”形分布，C_{27}规则甾烷相对含量低于C_{29}规则甾烷，但高于C_{28}规则甾烷；伽马蜡烷含量低，伽马蜡烷/C_{30}藿烷比值分布在0.16～0.60之间，平均值为0.30；C_{29}降藿烷 > C_{29}Ts > C_{30}重排藿烷，C_{29}Ts/C_{29}降藿烷和C_{30}重排藿烷/C_{30}藿烷比值分别为0.31～0.76和0.04～0.28，平均值分别为0.49和0.12；Ts≤Tm，介于0.66～2.56之间，平均值为1.33；$C_{29}\alpha\beta\beta/(\alpha\beta\beta+\alpha\alpha\alpha)$值较低，为0.31～0.57，平均值为0.38。这类原油主要集中分布在秦家屯、四五家子泉头组与登娄库组。

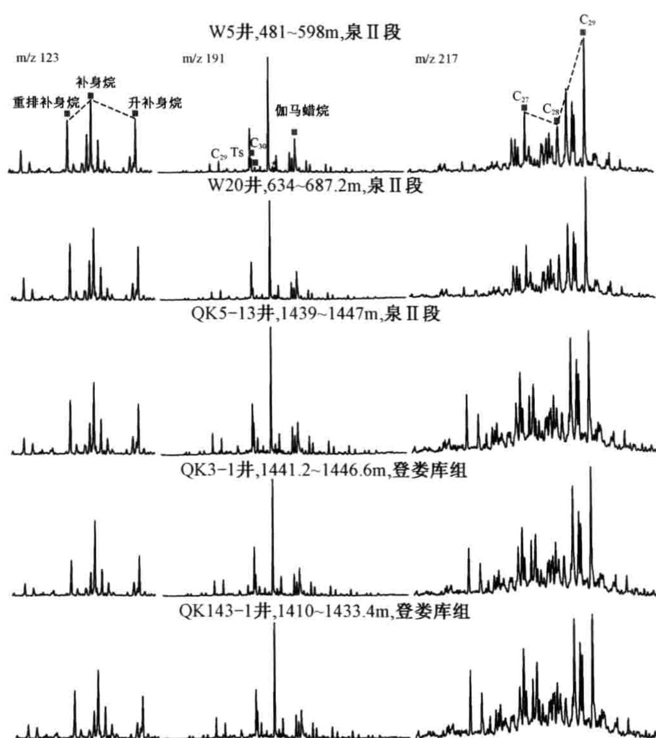


图3-23　梨树断陷Ⅰ类原油生物标志化合物特征分布图

（二）第Ⅱ类原油

这类原油主要为黄色、黄褐色、棕黑色，如图 3－24 所示，重排补身烷含量高，重排补身烷、补身烷和升补身烷呈“L”形分布，重排补身烷/补身烷比值介于 1.0～3.74 之间，平均值为 2.04；三环萜烷/五环三萜烷比值较高，为 0.43～4.17，平均值为 0.94，C_{24}四环二萜/C_{26}三环萜比值较低，为 0.1～0.29，平均值为 1.25，C_{28}三环萜烷和 C_{29}三环萜烷含量高；规则甾烷 C_{27}、C_{28}、C_{29}呈不对称“V”形分布，C_{27}规则甾烷 ≤ C_{28}规则甾烷 < C_{29}规则甾烷；伽马蜡烷含量高，伽马蜡烷/C_{30}藿烷比值分布在 0.42～1.10 之间，平均值为 0.74；C_{29}降藿烷 < C_{29}Ts < C_{30}重排藿烷，C_{29}Ts/C_{29}降藿烷和 C_{30}重排藿烷/C_{30}藿烷比值范围分别为 1.13～2.89 和 0.46～10.6，平均值分别为 1.73 和 1.79；Ts >> Tm，介于 4.56～10.44 之间，平均值为 6.94；C_{29}甾烷 $\alpha\beta\beta/(\alpha\beta\beta+\alpha\alpha\alpha)$值较高，介于 0.52～0.62 之间，平均值为 0.57。这类原油分布于八屋油田 BK60 区块、SN54 区块、皮家地区营城组与沙河子组和李家屯沙河子组。

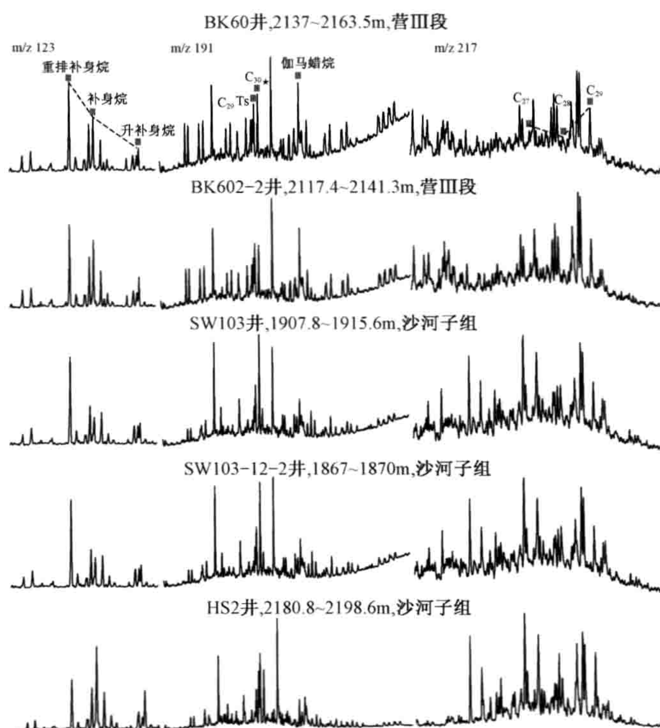


图 3－24　梨树断陷Ⅱ类原油生物标志化合物特征分布图

（三）混源油

混源油主要为黑色，如图 3－25 所示，重排补身烷、补身烷和升补身烷呈“L”形或倒“V”字形分布，重排补身烷/补身烷比值介于 0.42～1.48 之间，平均值为 0.96；三环萜烷/五环三萜烷比值范围是 0.14～1.4，平均值为 0.42，C_{24}四环二萜/C_{26}三环萜比值为 0.14～0.37，平均值为 0.25，C_{28}、C_{29}三环萜烷含量介于Ⅰ、Ⅱ类原油之间；规则甾烷 C_{27}、C_{28}、C_{29}呈不对称“V”形分布，C_{27}规则甾烷相对含量低于 C_{29}规则甾烷，但高于 C_{28}规则甾烷；伽马蜡烷/C_{30}藿烷比值分布在 0.34～0.8 之间，平均值为 0.48；C_{29}降藿烷 > C_{29}Ts = C_{30}重排藿烷，C_{29}Ts/C_{29}降藿烷和 C_{30}重排藿烷/C_{30}藿烷比值范围分别为 0.38～1.56 和 0.07～1.22，平均值分别为 0.79 和 0.32；

Ts > Tm，介于 1.16 ~ 5.35 之间，平均值为 2.85；C_{29}甾烷 $\alpha\beta\beta/(\alpha\beta\beta+\alpha\alpha\alpha)$值介于 0.45 ~ 0.53 之间，平均值为 0.51，梨树断陷登娄库组至沙河子组均有该类原油分布。

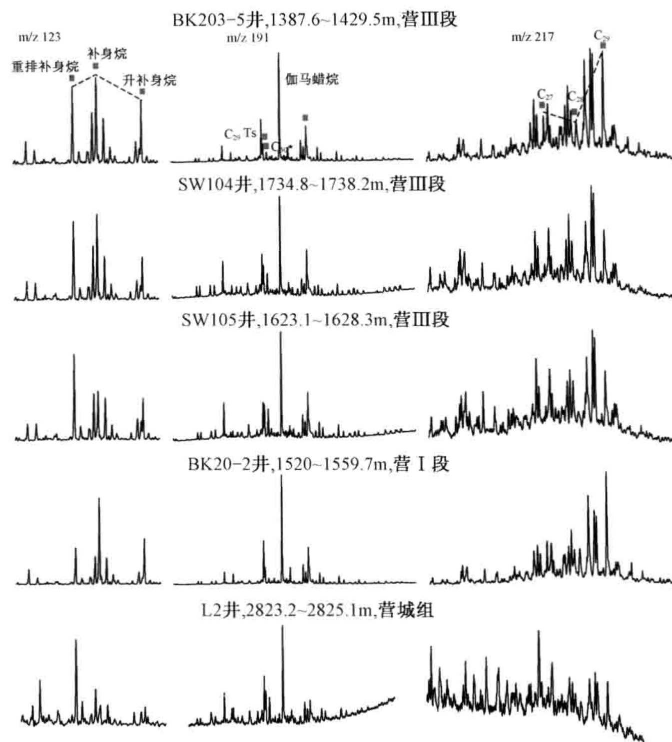


图 3－25 梨树断陷混源油生物标志化合物特征分布图

如图 3－26 所示，Ⅰ类原油具有较高的 C_{24}四环二萜/C_{26}三环萜烷，较低的重排补身烷/补身烷、三环萜烷/五环三萜、伽马蜡烷/C_{30}藿烷、Ts/Tm、C_{29} Ts/C_{29}降藿烷、C_{30}重排/C_{30}藿烷和 C_{29}甾烷 $\alpha\beta\beta/(\alpha\beta\beta+\alpha\alpha\alpha)$比值；而Ⅱ类原油则刚好相反，具有较低的 C_{24}四环二萜/C_{26}三环萜烷比值，较高的重排补身烷/补身烷、三环萜烷/五环三萜、伽马蜡烷/C_{30}藿烷、Ts/Tm、C_{29}Ts/C_{29}降藿烷、C_{30}重排/C_{30}藿烷和 $C_{29}\alpha\beta\beta/(\alpha\beta\beta+\alpha\alpha\alpha)$比值；Ⅲ类原油各参数介于Ⅰ类和Ⅱ类原油之间，$C_{24}$四环二萜/$C_{26}$三环萜烷、重排补身烷/补身烷、三环萜烷/五环三萜、伽马蜡烷/C_{30}藿烷、Ts/Tm、C_{29}Ts/C_{29}降藿烷、C_{30}重排/C_{30}藿烷和 C_{29}甾烷 $\alpha\beta\beta/(\alpha\beta\beta+\alpha\alpha\alpha)$比值，无一例外的均位于Ⅰ类和Ⅱ类原油之间，有以上特征可以明显看出，该类原油典型的为Ⅰ类和Ⅱ类原油的混源油。

图 3－26 很好地展示了各类原油主要的生物标志化合物参数比值分布，从图上可以看出，各类指标参数可以较好地划分出原油类型。此外，原油各馏分绝对浓度的分布也可以作为类型划分的依据，Ⅰ类原油正构烷烃绝对浓度小于 280μg/mg，萜烷浓度小于 4μg/mg，甾烷浓度小于 1μg/mg；Ⅱ类原油正构烷烃浓度大于 300μg/mg，萜烷浓度大于 10μg/mg，甾烷浓度大于 2μg/mg；Ⅲ类原油则介于Ⅰ类和Ⅱ类原油之间（表 3－1）。如图 3－27 所示，根据典型的 C_{29}Ts/C_{29}降藿烷、C_{30}重排藿烷/C_{30}藿烷和伽马蜡烷/C_{30}藿烷可以非常明显的区分开Ⅰ类和Ⅱ类原油，Ⅲ类原油上述参数则介于Ⅰ类和Ⅱ类原油之间，各区块原油类型划分结果见表 3－1。

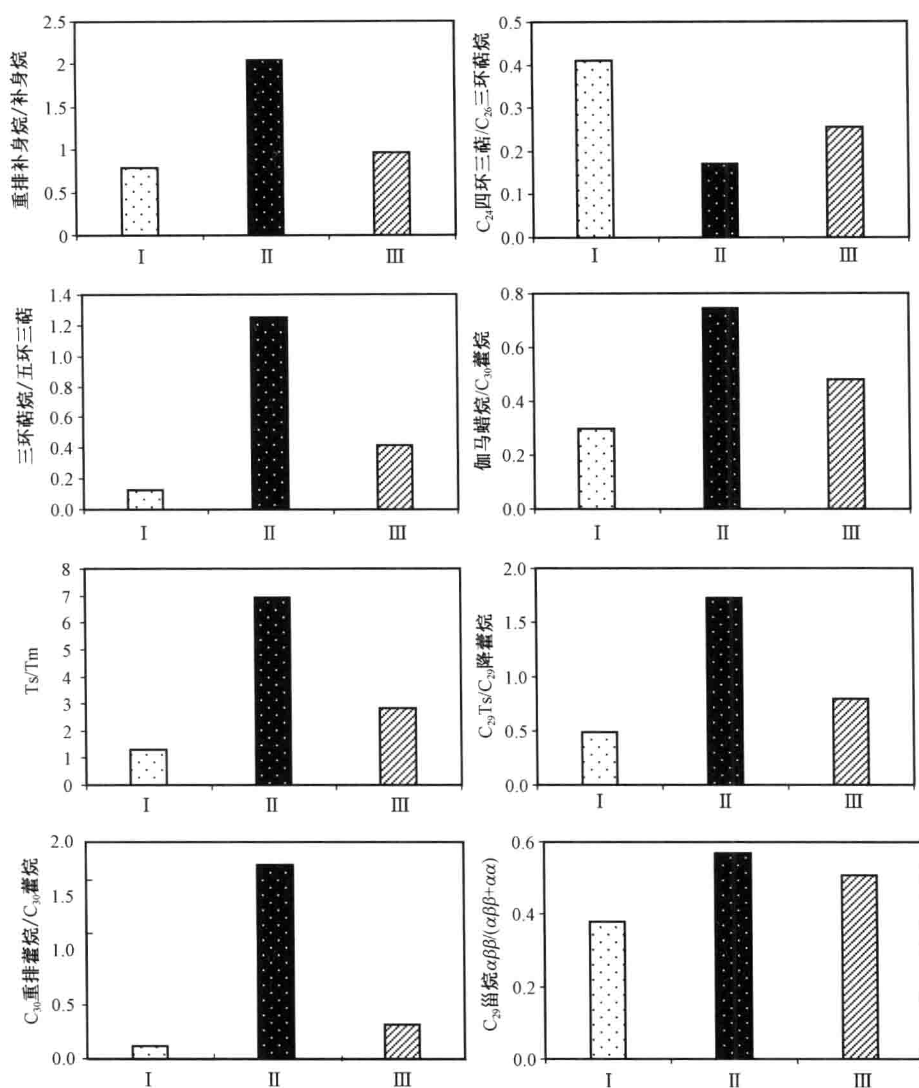


图 3－26　梨树断陷各类原油生物标志物参数分布图

表 3－1　梨树断陷不同类型原油地球化学特征及判识指标

	参数与化合物	Ⅰ类原油	Ⅱ类原油	Ⅲ类原油（混源油）
原油物性	颜色	黑色	黄色—黄褐色—棕黑色	黑色
参数指标	Ts/Tm	<1.8	>4	介于Ⅰ类和Ⅱ类之间
	C_{29}Ts/C_{29}藿烷	<0.6	>1	介于Ⅰ类和Ⅱ类之间
	C_{30}重排藿烷/C_{30}藿烷	<0.2	>0.5	介于Ⅰ类和Ⅱ类之间
	伽马蜡烷/C_{30}藿烷	<0.4	>0.5	介于Ⅰ类和Ⅱ类之间
绝对浓度	正构烷烃（μg/mg）	<280	>300	介于Ⅰ类和Ⅱ类之间
	萜烷（μg/mg）	<4	>10	介于Ⅰ类和Ⅱ类之间
	甾烷（μg/mg）	<1	>2	介于Ⅰ类和Ⅱ类之间

续表

	参数与化合物	Ⅰ类原油	Ⅱ类原油	Ⅲ类原油(混源油)
分布模式	二萜烷分布	C_{15}重排补身烷<补身烷	C_{15}重排补身烷>补身烷	介于Ⅰ类和Ⅱ类之间
	长链三环萜烷分布	C_{28}、C_{29}、C_{30}三环萜烷缺少或含量低	C_{28}、C_{29}、C_{30}三环萜烷极其丰富	C_{28}、C_{29}、C_{30}三环萜烷含量介于Ⅰ、Ⅱ类原油之间，含量受混合程度影响
	藿烷分布	Ts≤Tm	Ts≫Tm	Ts>Tm
		C_{29}降藿烷>C_{29}Ts>C_{30}重排藿烷	C_{29}降藿烷<C_{29}Ts<C_{30}重排藿烷	C_{29}降藿烷>C_{29}Ts=C_{30}重排藿烷
	甾烷分布	C_{27}R甾烷>C_{28}R甾烷<C_{29}R甾烷	C_{27}R甾烷≤C_{28}R甾烷≪C_{29}R甾烷	C_{27}R甾烷>C_{28}R甾烷<C_{29}R甾烷
分布状况	分布地区	秦家屯、四五家子泉头组与登娄库组原油为主	八屋BK60区块、SN54区块、皮家地区、李家屯地区营城组与沙河子组原油为主	梨树断陷登娄库组至沙河子组原油均有
	分布特征	浅部	深部	中部

二、混源油混合程度评价

通过前述原油化学组成可知，梨树断陷存在两种典型类型的原油，两者具有不同的地球化学特点：Ⅰ类原油具有生物标志化合物浓度高、C_{29}Ts、C_{30}重排藿烷和8β(H)－补身烷含量高；Ⅱ类原油生物标志化合物浓度较低、C_{29}Ts、C_{30}重排藿烷和8β(H)－补身烷含量低为特征，两类原油形成鲜明对照。因此，通过两类原油的配比计算研究，可以为原油混合特征的评价和混合比例的估算提供基础依据。

(一)端元油的选取

原油的地球化学特征和成因分类为配比计算端元样品的选取提供了基础依据。笔者选择QK1－2井1127～1168.8m泉Ⅰ段原油和BK62－3井2178～2181.6m营Ⅲ段原油分别作为Ⅰ类和Ⅱ类原油的端元油，进行了配比计算分析。图3－28展示了上述两种端元油及其分别按照5:95、10:90、30:70、50:50和70:30混合后的倍半萜和五环三萜类化合物组成特征变化。图左列为倍半萜组成，可以看出随着QK1－2井Ⅰ类原油混入比例的增加，BK62－3井Ⅱ类原油的特征逐渐向Ⅰ类原油变化。最为明显的就是随着QK1－2井Ⅰ类原油混入比例的增加，C_{15}重排补身烷丰度逐渐减低，8β(H)－补身烷丰度逐渐升高；而图3－28右边的五环三萜类化合物，由于Ⅰ类原油该系列化合物绝对浓度要远远高于Ⅱ类原油，数值差异在1至2个数量级，因此使得5%的QK1－2井Ⅰ类原油的混入，使五环三萜类化合物的组成特征类似于Ⅰ类原油。

(二)配比参数的选择

由于原油在配比过程不存在化学反应，因此，当用A、B两个油样进行配比实验时，在已知这两个油样化合物的浓度后，由不同比例的A、B两油样配比成的混合油样的化合物浓度，可通过配比比例进行加权加和计算得出。也就是说，新配比的油样的化合物浓度可以通过数学

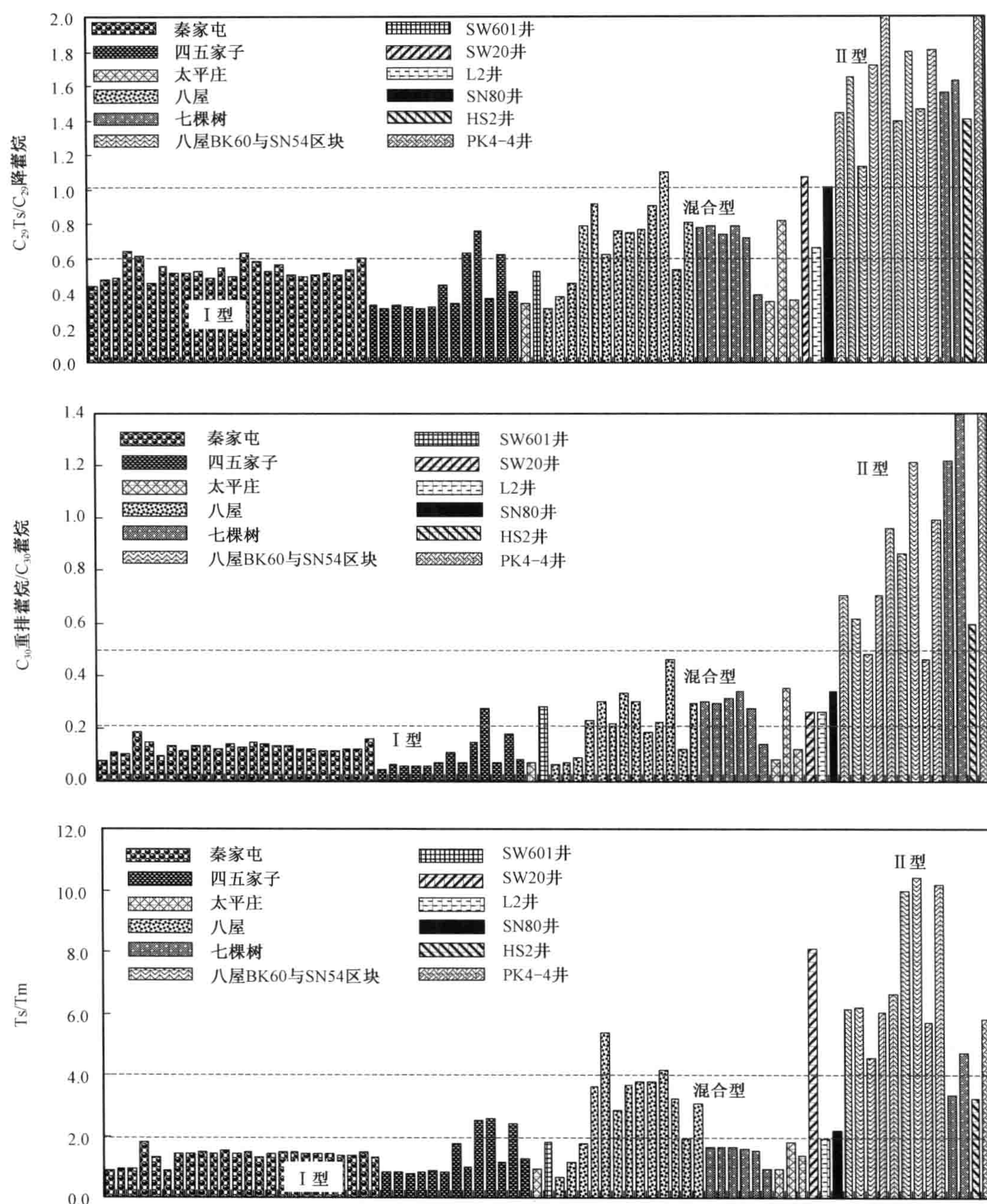


图3-27　梨树断陷不同类型原油地球化学参数分布图

计算方法得到。理论上,在不存在误差的情况下,原油按一定的比例配比后,由于存在加权加和性,因此,新配比的原油样品中某个化合物的浓度,应和新配比原油样品两个端元样混合的百分比呈线性关系。由图3-29可以看出,总体上,配比实验分析得到的不同类别的化合物浓度与配比比例间存在较好的正相关关系,且这种正相关关系不受端元油化合物浓度大小的影响。

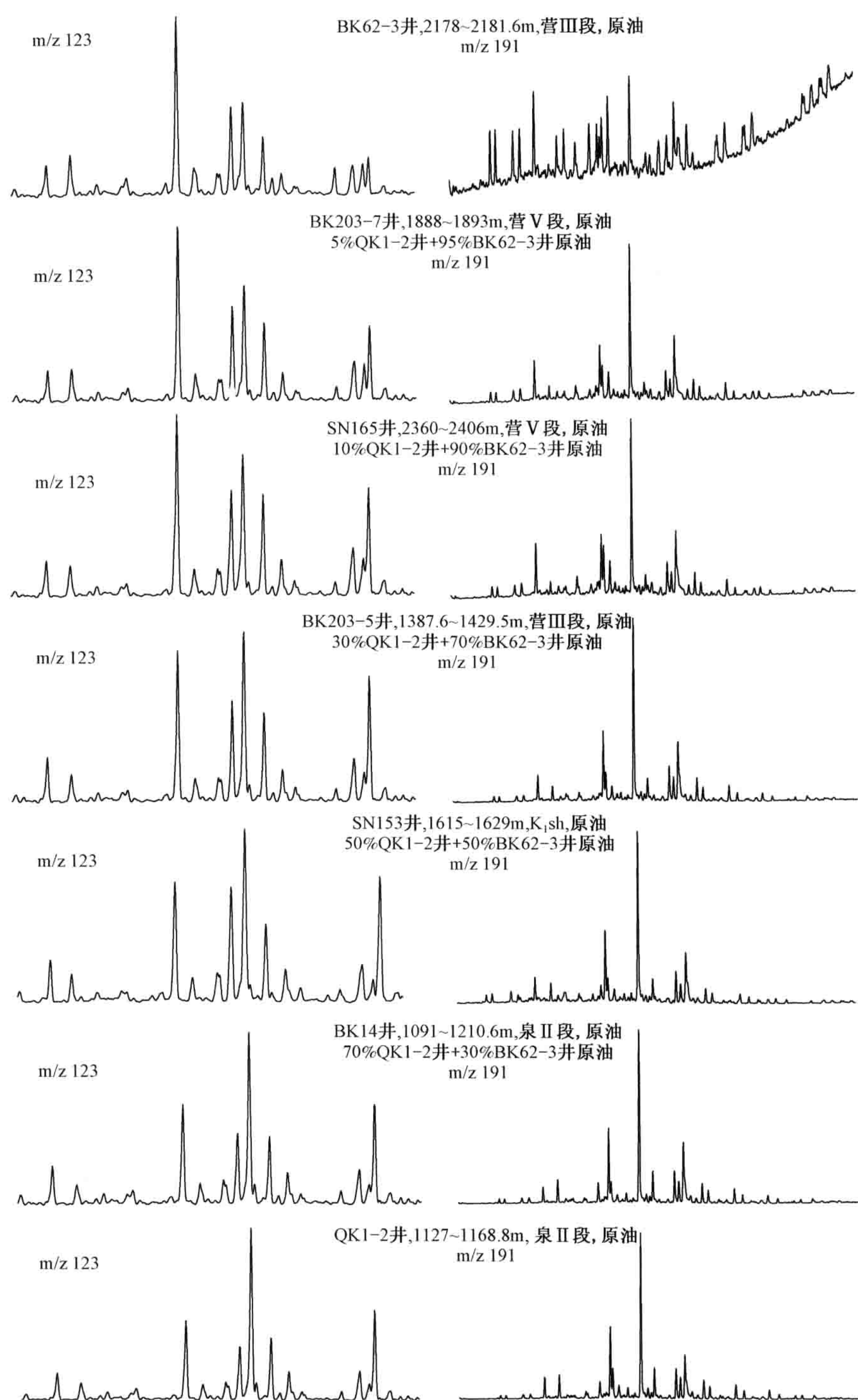


图 3－28　BK62－3 井和 QK1－2 井原油理论计算后倍半萜和五环三萜类化合物组成变化特征

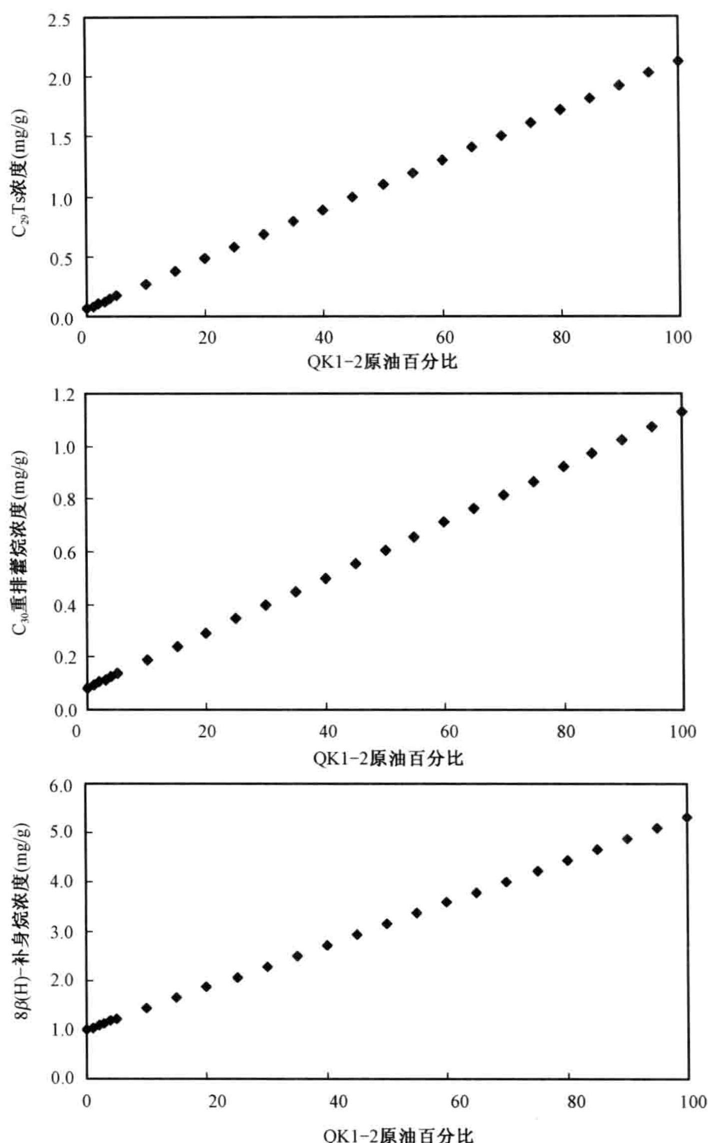


图3－29　QK1－2和BK62－3井配比计算后部分化合物的浓度变化趋势

由此可见，就配比计算研究的地球化学意义讲，在地质体中，当不同来源的原油混合后在没有发生明显的次生变化的情况下，原油混合后化合物的浓度特征是应严格遵循加权加和关系的。也就是说，在所选择的端元样品进行了浓度分析的前提下，混合后化合物浓度的理论计算结果可以更准确地表示原油混合后化合物组成和浓度的变化特点。

由于Ⅰ原油各类化合物浓度均高于Ⅱ类原油数十倍仍至上百倍，因此，混源油中化合物的浓度主要取决于Ⅰ原油的浓度。从图3－28可以看出，当5% QK1－2井Ⅰ原油与95% BK62－3Ⅱ类原油混合后，混合原油的甾萜类组成就表现出QK1－2井Ⅰ类原油的特征。图3－30更清楚地反映了这一特点：QK1－2井Ⅰ原油配比量在100%～95%范围内，虽然配比原油中相关化合物的浓度具有一定的变化，但有关化合物的比值变化却很小，其中 C_{29} Ts/C_{29} H 从

0.46 变至 0.64，C_{30}重排藿烷/C_{30}藿烷从 0.09 变至 0.21，C_{15}重排补身烷/8β(H)－补身烷的变化稍显均匀，更能反映混合程度与组成的变化性。究其原因，主要是因为五环三萜类化合物和甾烷化合物两类原油中浓度相差较大，为几十到上百倍，因此使得该类化合物参数比值多反映浓度高的原油特征。

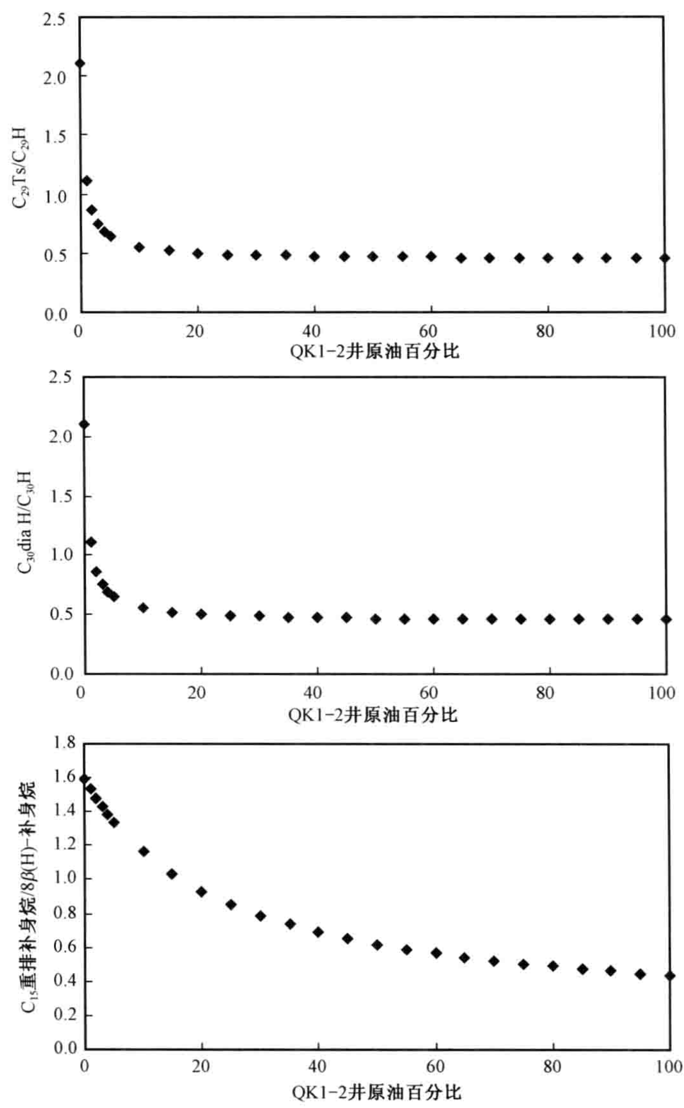


图 3－30　QK1－2 井和 BK62－3 井配比计算后部分化合物比值变化趋势

图 3－31 为不同混合程度下 C_{29}Ts/C_{29}H 和 C_{30}dia H/C_{30}H 的变化规律，可以看出，计算的混合样品点基本上集中于靠近 QK1－2 井 Ⅰ 原油一侧，这主要是由于其浓度较大所致，不能较好的反映混合油化学组成的变化规律，然而倍半萜化合物在两类原油之间浓度差异较小，倍数基本在十以内，使得其参数比值能均匀的表征出混合程度与原油组成之间的一致性变化（图 3－32）。

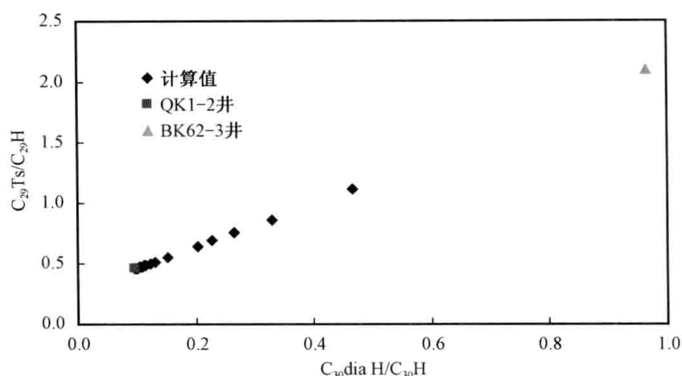


图 3－31　不同混合程度下藿烷类参数比值变化趋势

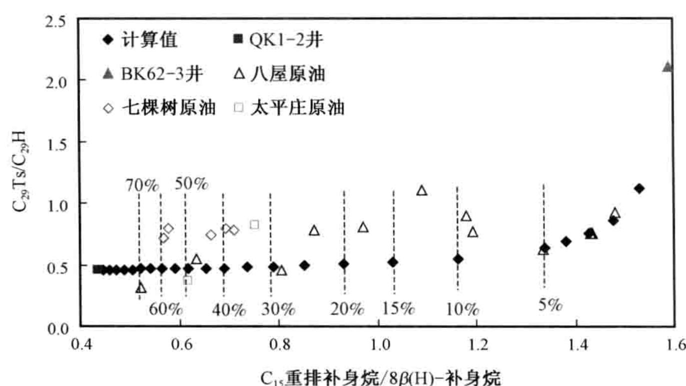


图 3－32　梨树断陷混源油混合程度判识图版

因此，主要利用补身烷系列化合物来进行混源油配比的计算，遴选出的 C_{15} 重排补身烷/8β（H）－补身烷参数能非常好的展示不同混合程度与原油组成的变化。

梨树断陷混源油主要位于八屋、七棵树和太平庄地区。由图 3－32 可以看出，八屋地区原油主要位于Ⅰ类原油混合比例在 2%～30% 的范围内；七棵树地区原油主要位于Ⅰ类原油混合比例在 37%～60% 的区域，太平庄地区原油主要位于Ⅰ类原油混合比例在 34%～50% 的区域。梨树断陷的混源油主体为Ⅱ类原油，基本位于 50% 以上，不同地区Ⅰ类原油混入的程度存在差异。八屋地区靠近混源油分布区的西侧，Ⅰ类原油混入有限，推测这与该区的西侧分布了大量Ⅱ类原油（比如：八屋 BK60 区块和 SN54 区块）具有一定关联；太平庄和七棵树地区位于混源油分布区的东侧，Ⅰ类原油混入程度相对较高。

第四章 天然气特征与类型

相对原油组成而言，天然气的组成相对简单，目前能获取的主要地球化学数据为其化学组成和同位素组成，但每种数据都会受到诸如成因、热演化程度、分馏、运移等多方面因素的影响，因此，天然气研究对所能获取的地球化学信息要尽可能地综合分析。

梨树断陷天然气资源丰富，本书所研究的天然气样品分别取自北部斜坡带的皮家气田、苏家屯 L2 井，中央构造带的四五家子油气田、八屋油气田、后五家户气田和孤家子气田，以及东南斜坡带的新立油气田及东缘的李家屯河山 HS2 井和南缘金山 L6 井。对这些样品进行了天然气化学组成、烷烃气和二氧化碳气的碳同位素组成及浓缩轻烃分析。选取典型烃源岩样品进行了源岩吸附气轻烃色谱，并开展直接气源对比研究。

第一节 天然气化学组成

梨树断陷天然气的化学组成主要包括烃类气体、无机气体和稀有气体。笔者在系统剖析梨树断陷天然气地球化学地球化学特征基础上，也对其化学组成特征进行了详细研究。

一、烃类组成

梨树断陷天然气样品富含烃类化合物，非烃类化合物含量较低。各油气田烃类气体含量差异并不大，烃类气体占绝对优势，含量 >90%，介于 92.08% ~98.44% 之间(图 4 –1)。平面上，与非烃含量变化趋势相对应，断陷中心的油气田天然气中烃类含量较低。相对而言，孤家子气田烃类气体含量最低，为 92.08% ~95.17%；断陷边缘三个深层天然气样品和后五家户烃类气体含量最高，为 97.39% ~99.15%。烃类气体中，又以甲烷为主，重烃为辅，重烃含量介于 1.19% ~10.66% 之间(图 4 –2)。其中孤家子、后五家户地区重烃含量最低，分别介于

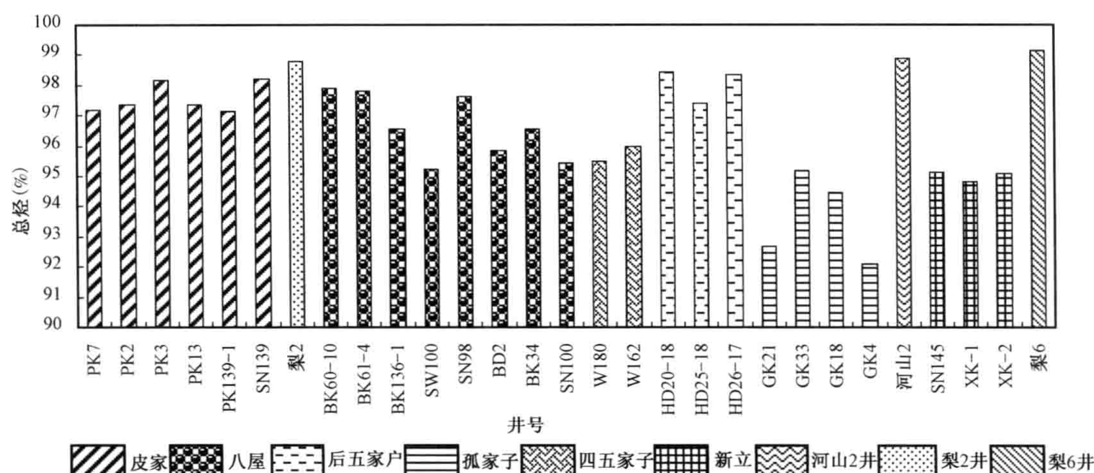


图 4 –1 梨树断陷天然气样品的总烃含量

1.19% ~2.00%和1.75% ~1.86%之间；皮家地区整体重烃含量较高，为5.88% ~8.48%；八屋油气田天然气样品的重烃含量变化较大，介于2.96% ~10.66%之间；新立地区三个天然气样品的重烃含量中等，变化也不大，介于3.17% ~3.63%之间。四五家子地区虽然只取到了2个样品，但差别较大，深度很浅的W162井样品重烃含量仅为1.55%，而深度较大的W180的重烃含量则为6.76%。至于断陷南缘和北缘的三个深层天然气样品则具有最重的重烃含量，李家屯地区HS2井重烃含量高达17.24%，金山地区L6井为8.2%，苏家屯地区L2井则为12.09%（图4-2）。平面上，重烃含量在断陷边缘样品中含量较高，断陷中心样品含量较低，重烃含量<5%的样品均位于断陷中心部位的孤家子气田、后五家户油气田和新立油气田。

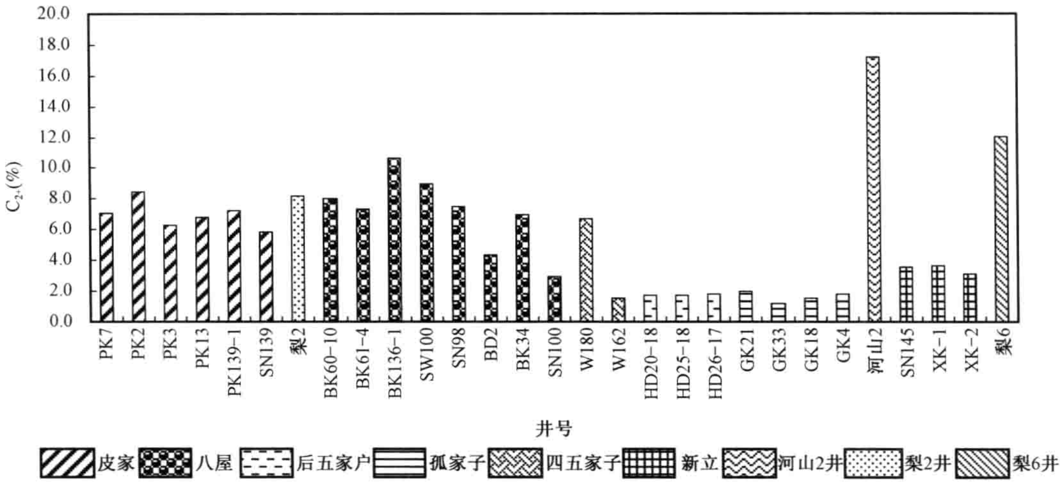


图4-2 梨树断陷天然气样品的重烃气体含量

从干燥系数$C_1/(C_1—C_5)$分布来看，梨树断陷天然气干燥系数均在0.80以上，介于0.83~0.99之间。其中孤家子、后五家户和新立等地区的天然气均为干气，$C_1/(C_1—C_5)>0.95$，八屋油气田和皮家气田基本为湿气，八屋油气田天然气干燥系数变化较大，介于0.89~0.97之间；四五家子地区2个样品的干燥系数也有差异，分别为0.93%和0.98%。显然，断陷边缘的3个样品具有最低的干燥系数，为梨树断陷最湿的天然气，尤以李家屯地区HS2井特征最为明显（图4-3）。也就是说，平面上，断陷西北部的皮家气田、李家屯地区HS2井和金山地区L6井具有较低的干燥系数。同时，断陷中心的八屋油气田和四五家子油气田的部分样品也为湿气。而断陷中心的孤家子气田、后五家户油气田和新立油气田的样品均为干气，暗示了天然气的组成可能受母质来源和成熟度影响较大。纵向上，整个梨树断陷的天然气干燥系数随埋藏深度的降低而升高，即天然气储层埋深越浅，天然气越干，表明梨树断陷的干燥系数可能主要受运移影响。其中八屋和四五家子油气田天然气的干燥系数随埋深变浅而加大的趋势最明显（图4-4），可能说明了这两个油气田天然气干燥系数受运移影响较明显，而其他油气田或者气田的样品，可能是由于深度相差不大，导致干燥系数变化不大。运移作用使天然气发生运移分馏效应，随着运移距离的增加，分子量相同的化合物，分子半径小的化合物含量相对增加，分子半径大的化合物含量则相对降低，因此，随着运移距离的增加，iC_4/nC_4升高；分子量不同的化合物，则随运移距离的增加，分子量大的化合物含量相对降低，分子量低的化合物含量相对增加，因此，随运移距离的增加，iC_4/nC_3降低。吴志勇从分子极性、分子量和分子直径的角度探讨了参数递减或递增的机理，将$R_3=iC_4/nC_4$和$R_4=iC_4/nC_3$组合起来构成另一个参数ΔR_3

$=(|R_3-R_4|/R_4)$；组合后，该指标受母质类型的影响变小，更能反映运移色层效应，是一个良好的运移专属性指标。但是，整体来看，该运移指标在梨树断陷区并没有随深度呈现规律性的变化。从单个油气田来看，皮家和八屋深部的样品（埋深 >2000m）随深度变浅，ΔR_3 升高，反映了天然气运移的影响。但是，其他埋深较小的样品并没有此变化趋势，孤家子气田甚至随埋深变浅 ΔR_3 升高而降低（图4-5），可能说明了影响孤家子气田烃类气体组成的控制性因素并不是运移作用，更有可能与烃类气体的来源或成熟度有关。

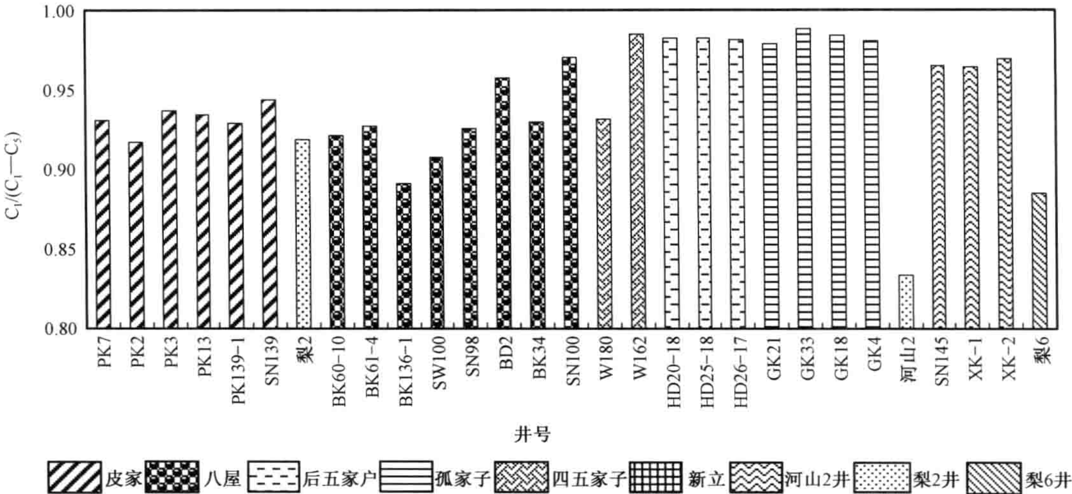


图4-3　梨树断陷天然气样品的干燥系数

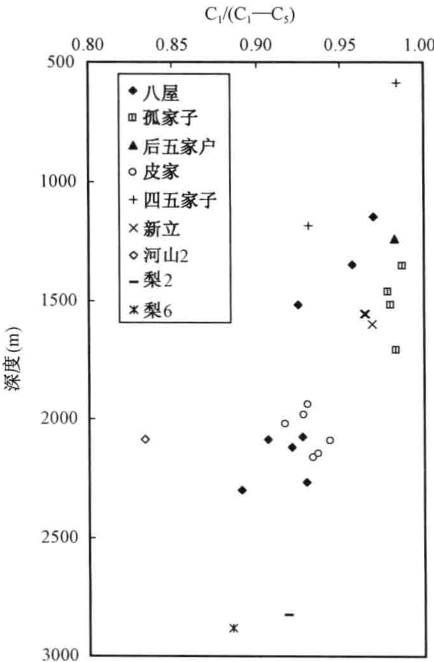


图4-4　梨树断陷天然气干燥系数随深度化图

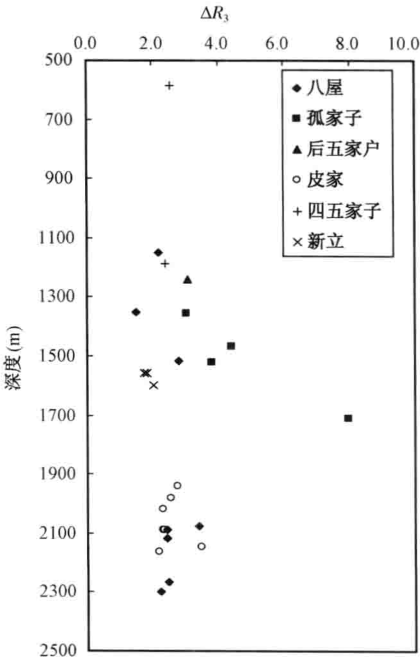


图4-5　梨树断陷天然气运移指标随深度变化图

二、非烃组成

梨树断陷天然气非烃类化合物含量较低，总体来看，非烃含量介于1.56%～7.92%之间。不同油气田所产天然气的非烃含量不同（图4-6），以孤家子地区天然气的非烃含量最高，介于4.83%～7.92%之间；后五家户和皮家地区非烃含量最低，介于1.56%～2.87%；四五家和新立地区非烃含量变化较小，四五家子地区为4.01%～4.49%，新立地区为4.88%～5.18%；八屋地区非烃含量变化相对较大，介于2.10%～4.77%之间。而位于断陷边缘的三口井的样品，河山2井、梨2井和L6井均具有很低的非烃含量，为梨树断陷最低。

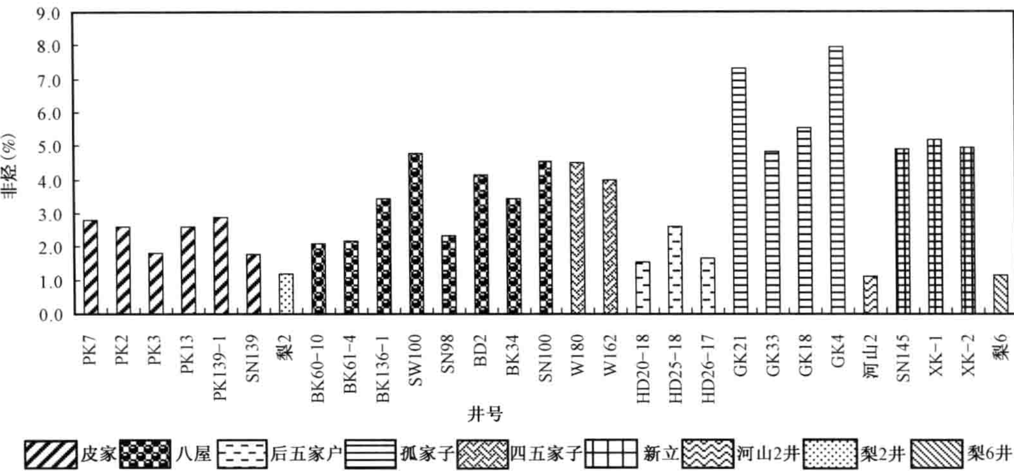


图4-6 梨树断陷不同地区天然气样品的非烃含量变化图

梨树断陷天然气样品中所检测出的非烃类气体为CO_2和N_2，以N_2为主，CO_2含量极低，CO_2含量最高者也仅达0.54%，多数样品不含CO_2。相对而言，八屋和皮家地区CO_2含量较其他地区高，后五家户、新立和孤家子地区基本不含CO_2。总体而言，N_2含量介于1.56%～7.88%之间，以孤家子和新立地区N_2含量最高，孤家子地区介于4.83%～7.88%之间，新立地区介于4.88%～5.13%之间；四五家子地区N_2含量居中，为4.01%～4.36%；八屋、后五家户、皮家地区最低，为1.56%～4.54%，其中八屋地区N_2含量变化较大，介于1.94%～4.54%之间。李家屯地区河山2井、金山地区梨6井和西缘苏家屯地区梨2井具有最低的N_2含量，梨2井的CO_2含量为梨树断陷最高，但仍未超过1%，仅为0.86%（图4-7）。

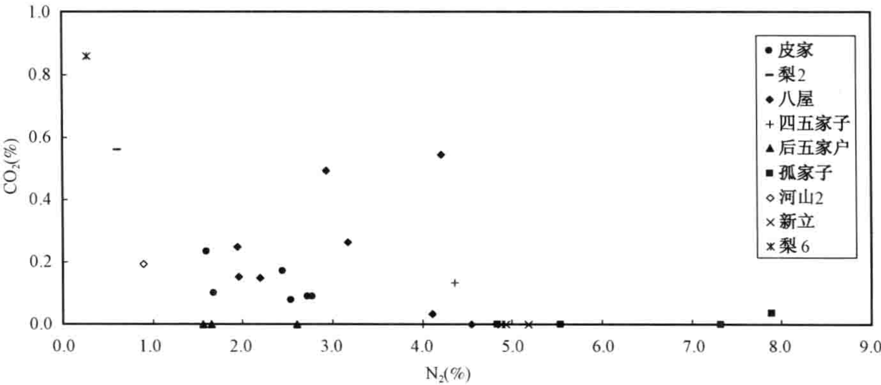


图4-7 梨树断陷天然气样品的N_2和CO_2气体含量关系图

总的看来，非烃气体含量在断陷北部斜坡带、中央构造带和东南斜坡带，存在由低到高再降低的变化趋势，越靠近断陷中心，非烃气体含量相对较高。天然气样品的 N_2 随深度变化图（图 4－8）显示天然气中 N_2 含量与埋深关系不大，但是，在深度范围 3000～1500m 之间，天然气中 N_2 含量与埋深呈反比，随埋深变浅，N_2 含量增加。该趋势在皮家气田样品中也可发现，可能说明了运移分馏效应对天然气非烃组成的影响。

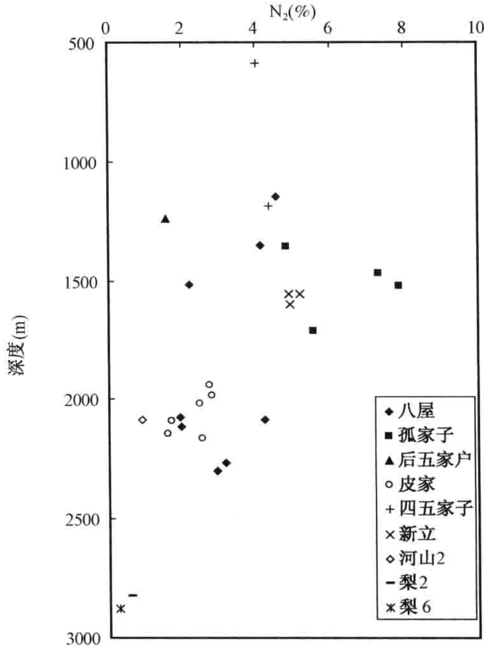


图 4－8　梨树断陷天然气样品的 N_2 随深度变化图

第二节　天然气碳同位素组成

梨树断陷样品的 CO_2 含量极低，最高仅 0.54%，孤家子和新立地区的气样甚至不含 CO_2，因而所获得的 CO_2 的碳同位素数据很少，仅有 5 个，变化幅度较小，介于 －9.1‰～－12.1‰。八屋油气田有 3 个 CO_2 碳同位素数据，包括梨树断陷最重和最轻 CO_2 的碳同位素；皮家气田 PK13 井的 $\delta^{13}CO_2$ 为 －10.3‰；四五家子油气田 W180 井的 $\delta^{13}CO_2$ 为 －11.7‰（图 4－9）。

烃类气体的碳同位素组成主要介于 －45.6‰～－23‰之间，其中甲烷的碳同位素变化范围较大（图 4－10），$\delta^{13}C_1$ 最轻的样品位于四五家子油气田 W162 井，为 －45.6‰，该油田的另外一口井 $\delta^{13}C_1$ 则与之相差很大，为 －32.3‰，表明这 2 个样品很可能有成因上的差别。油气田内部差别较大的还有孤家子气田，GK33 井样品的 $\delta^{13}C_1$ 为 －35.8‰，其他 3 个样品的 $\delta^{13}C_1$ 较重，介于 －23.0‰～－21.8‰之间。总体看来，八屋油气田的 $\delta^{13}C_1$ 最轻，介于 －39.2‰～－34.7‰；其次为皮家气田，为 －35.1‰～－33.8‰；后五家户气田天然气的 $\delta^{13}C_1$ 较重，为 －28.6‰～－34.2‰；新立油气田和孤家子气田天然气的 $\delta^{13}C_1$ 最重，大多数位于 －23.1‰～－21.8‰之间。至于盆地边缘的三个样品，其甲烷碳同位素组成明显较轻，李家屯河山 2 井 $\delta^{13}C_1$ 为 －35.4‰，金山地区 L6 井 $\delta^{13}C_1$ 为 －32.4‰，苏家屯地区 L2 井 $\delta^{13}C_1$ 为 －41.1‰，较与其相毗邻的皮家气田的天然气甲烷偏轻。

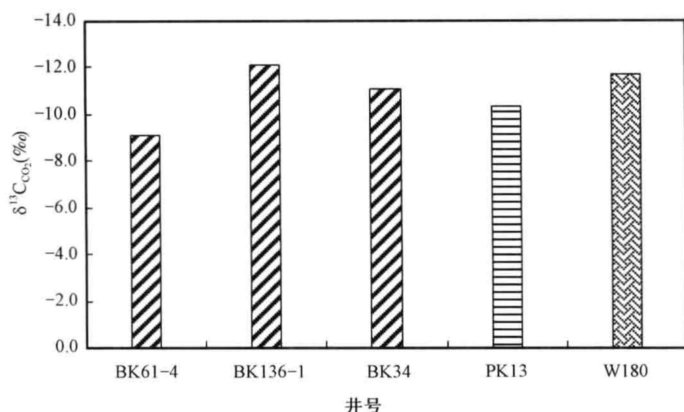


图 4-9　梨树断陷天然气中 CO_2 的碳同位素组成图

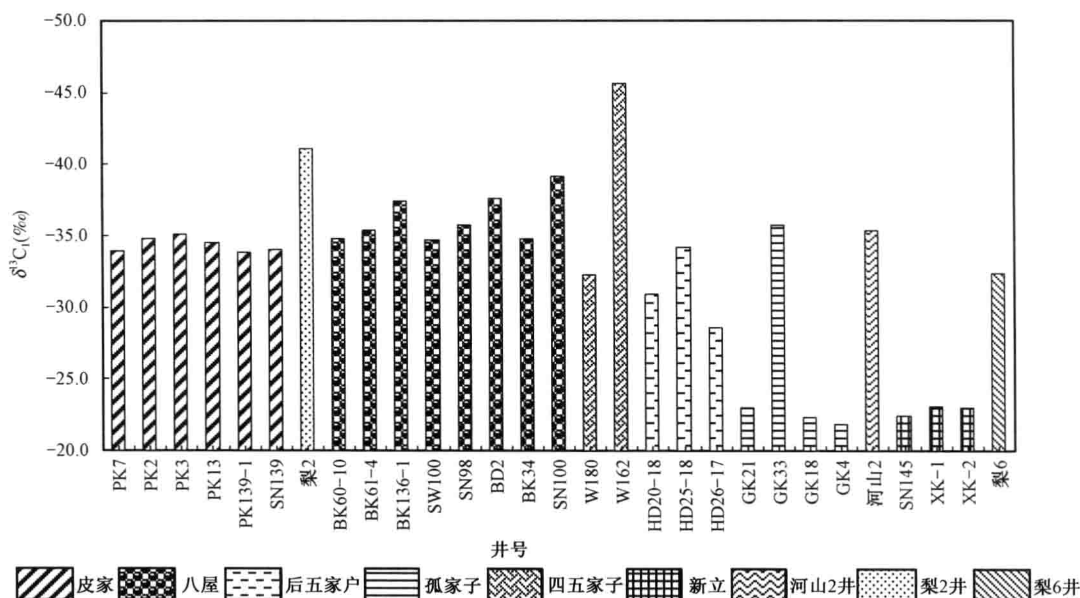


图 4-10　不同油气田天然气甲烷碳同位素组成

平面上，暂不考虑几个甲烷碳同位素明显偏轻的样品的话，从断陷的北部斜坡带到中央构造带，再到东南斜坡带，甲烷碳同位素有变重的趋势。而部分样品明显偏轻，可能反映了母质类型或成熟度或多期混源的影响。

乙烷碳同位素组成在不同油气田间亦有很大差别，在八屋油气田、后五家户气田和四五家子油气田内部变化也较大（图 4-11）。断陷内乙烷碳同位素最轻的样品出现在后五家户气田，最重的则出现在新立油气田。总体来说，后五家户地区的 $\delta^{13}C_2$ 最轻，在 -32.5‰～-29.3‰之间变化；八屋油气田次之，$\delta^{13}C_2$ 介于 -31‰～-28.3‰之间；四五家子地区 2 个样品的 $\delta^{13}C_2$ 则分别为 -29.0‰和 -30.4‰。皮家气田的 $\delta^{13}C_2$ 变化较小，介于 -30.3‰～-29.7‰之间。新立油气田和孤家子气田乙烷富含重碳同位素，$\delta^{13}C_2$ 介于 -26.1‰～-25.2‰之间。断陷东缘河山 2 井和西北缘 L2 井的天然气乙烷碳同位素相对较轻，分别为 -28.4‰和 -28.8‰，盆地南缘的乙烷碳同位素则明显较重，为 -25.1‰，可能反映了母质类型的差异。

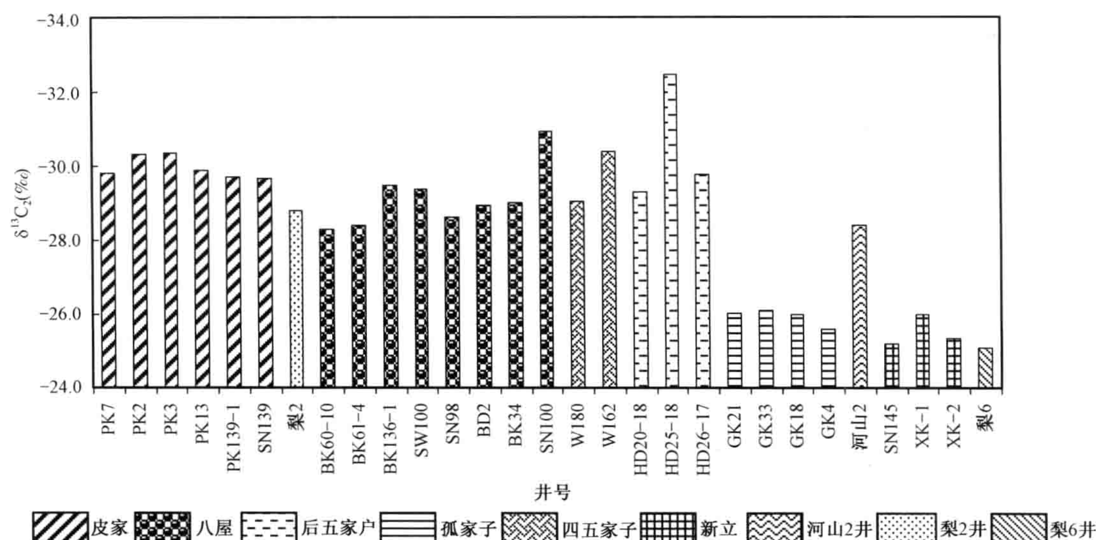


图4-11　不同油气田天然气乙烷碳同位素组成

值得注意的是，平面上乙烷碳同位素组成的分布与甲烷碳同位素的分布出现了较大差异（图4-12）。总体上，天然气样品的乙烷碳同位素组成并没有出现甲烷碳同位素组成的明显差异，四五家子地区2个天然气样品以及孤家子气田GK33井的乙烷碳同位素组成均与相邻样品相似。盆地西缘的L2井 $\delta^{13}C_1$ 明显较邻近皮家气田轻，$\delta^{13}C_2$ 则稍重，可能反映L2井与皮家气田有着不同的天然气成藏史。东南斜坡带东缘的HS2井的 $\delta^{13}C_1$ 和 $\delta^{13}C_2$ 均较相邻的新立油气田轻，但 $\delta^{13}C_1$ 差值明显较大，可能反映了成熟度的影响。而同样是东南斜坡带，但处于盆地南缘的L6井天然气与新立气田天然气的关系与L2井相似，可能也反映着天然气成藏方面的差异。

除南缘的L6井外，丙烷碳同位素组成在不同油气田间差别较小（图4-13），总体看来，后五家户气田的 $\delta^{13}C_3$ 最轻，在-31.6‰～-29.8‰之间变化；其次为孤家子气田，$\delta^{13}C_3$ 介于-29.9‰～-27.9‰；再次为八屋油气田和皮家气田，$\delta^{13}C_3$ 分别介于-28.8‰～-27.0‰和-28.4‰～-27.6‰之间。新立油气田的 $\delta^{13}C_3$ 较重，介于-26.4‰～-25.9‰之间。四五家子地区2个气样丙烷碳同位素变化较大，分别为-27.6‰和-25.2‰。盆地南缘金山地区L6井具有梨树断陷最重的丙烷碳同位素，$\delta^{13}C_3$ 为-23.4‰，相对而言，李家屯地区HS2井和盆地西缘苏家屯地区L2井具有相对较轻的丙烷碳同位素，$\delta^{13}C_3$ 分别为-26.8‰和-27.2‰。平面上，各油气田天然气样品的 $\delta^{13}C_3$ 相差不大，以盆地中心的后五家户油气田和孤家子气田的天然气丙烷偏重。

纵向上，似乎埋深1700m是一个转折点，深度浅于1700m，$\delta^{13}C_1$ 随深度变浅而变轻（图4-14），似乎表征了成熟度的差异，埋深越浅，天然气的成熟度越低，可能与天然气的排驱运移有关；随深度变浅，$\Delta\delta^{13}(C_2—C_1)$ 由碳同位素倒转（图4-14），$\Delta\delta^{13}(C_2—C_1)$ 值由孤家子GK4井最小-3.8‰增大到四五家子W162井的15.2‰。如果说 $\Delta\delta^{13}(C_2—C_1)$ 主要受成熟度变化影响的化，则该变化趋势明显表征了随埋深变浅天然气的成熟度显著降低的趋势。

与此相对应的是，埋深大于1700m，该指标则出现相反的变化趋势，随埋深的增加，甲烷碳同位素组成变轻，$\Delta\delta^{13}(C_2—C_1)$ 差异增大。

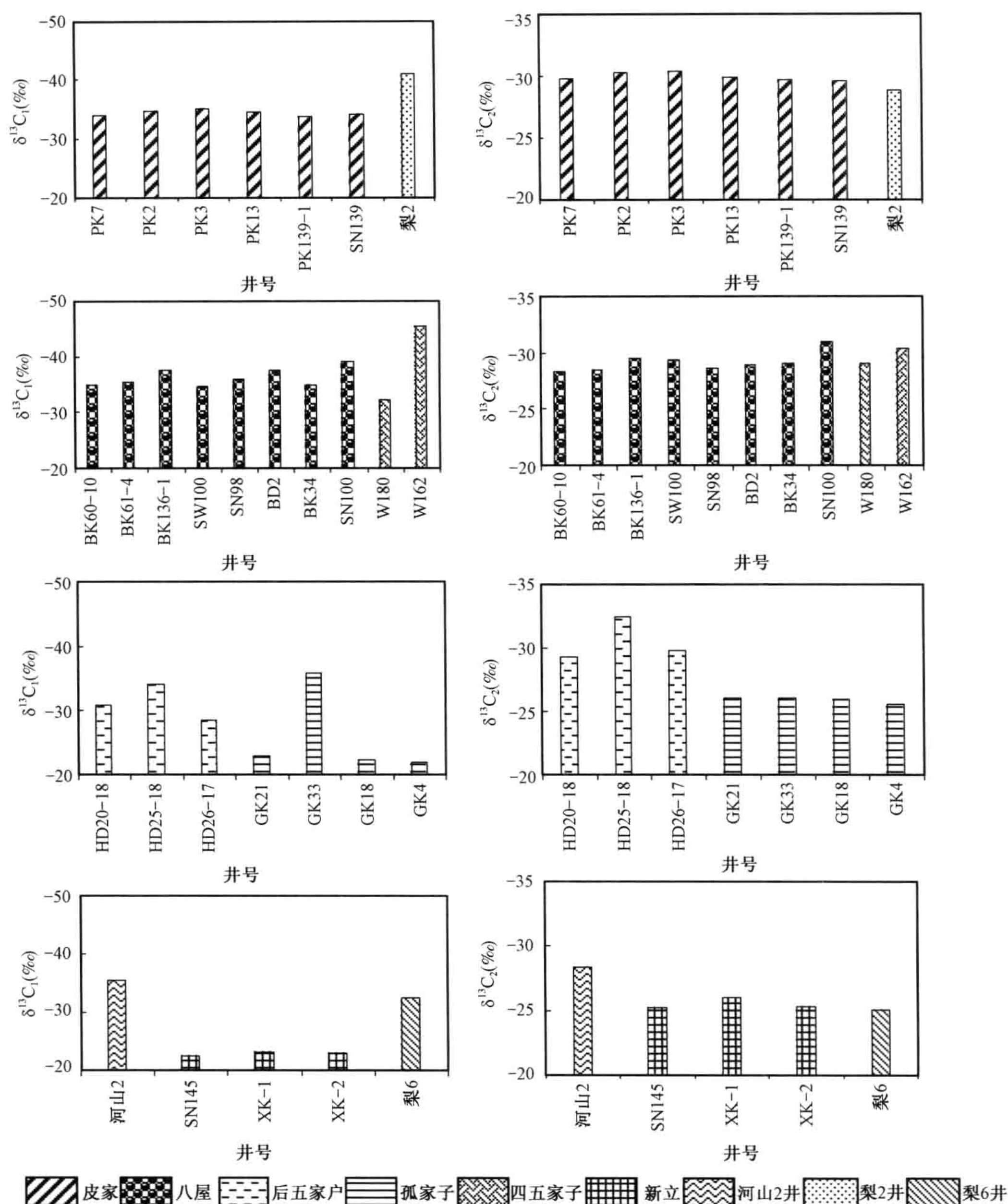


图 4-12　梨树断陷天然气甲烷、乙烷碳同位素组成关系图

值得注意的是，造成转折点如此显著的原因主要是孤家子气田和新立油气田的甲烷碳同位素明显偏重。如果撇开这 2 个油气田的样品，则梨树断陷天然气的甲烷碳同位素及其与乙烷碳同位素的组成随深度的变化仍有此趋势，只是显著性降低。如果说浅层的这种成熟度变化趋势受天然气的运移聚集影响的话，深层天然气的变化趋势则可能反映的是不同期次天然气混合的影响。

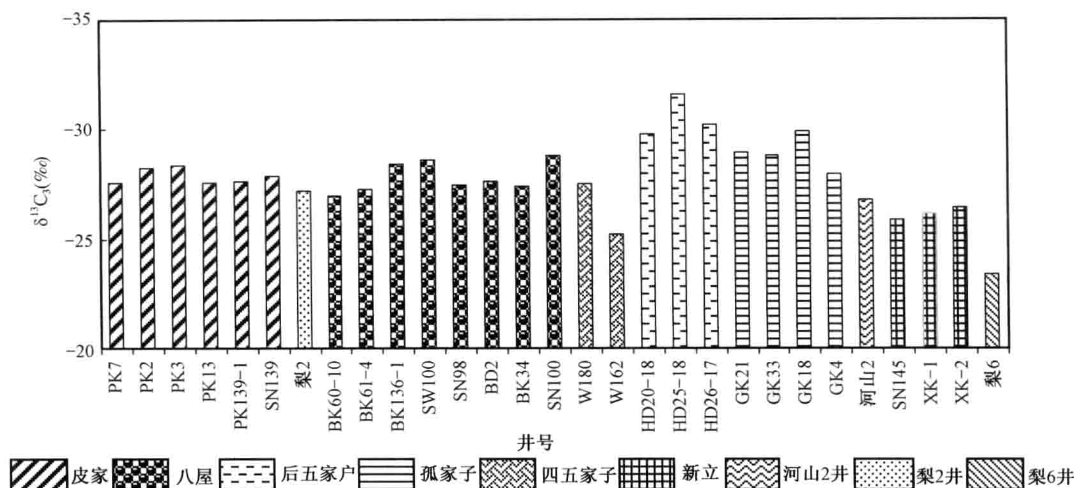


图 4－13　不同油气田天然气丙烷碳同位素变化图

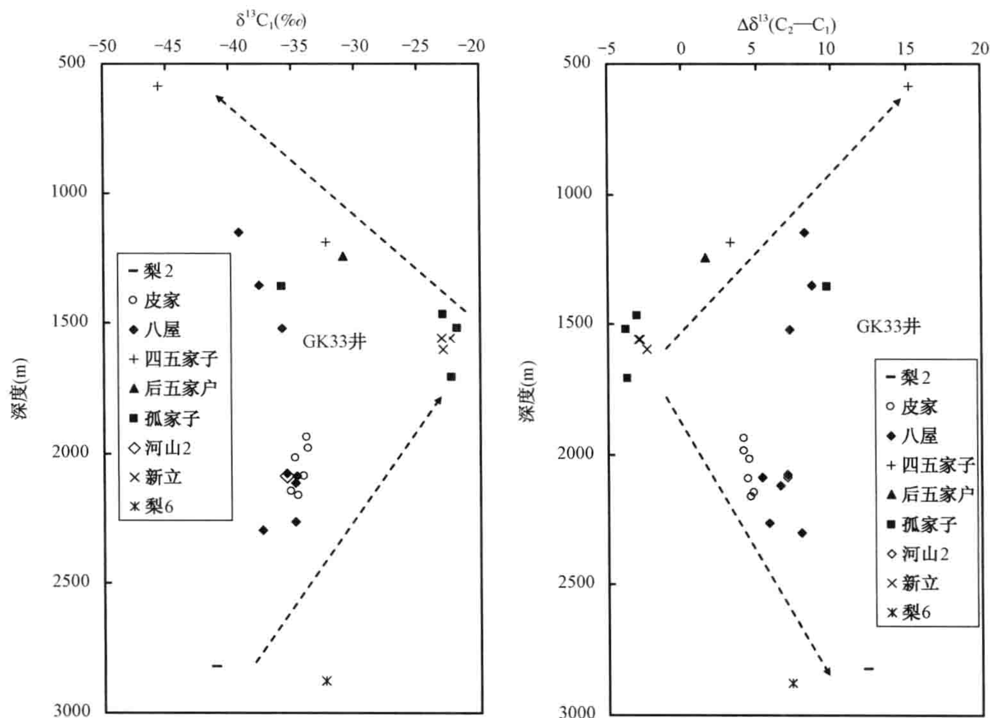


图 4－14　不同油气田天然气 $\delta^{13}C_1$ 与 $\Delta\delta^{13}(C_2—C_1)$ 随深度变化图

平面上，北部斜坡带和东南斜坡带的天然气样品埋深均较深，其变化趋势与天然气样品的总体变化趋势相同，但 L6 井则不同，可能寓示了梨树断陷的天然气有多期生气排气过程，早期的较老的地层生成较高成熟度的天然气排出聚集成藏后，后期较新地层进入生气阶段，排出后在较深部位聚集成藏。至于中央构造带八屋油气田、后五家户油气田和孤家子气田所取得的天然气样品埋深均较浅，其中四五家子油气田的 2 个天然气样品明显随埋深变浅，成熟度降低；八屋油气田也存在着相似的变化趋势，但变化范围小得多。

第三节 天然气轻烃组成

轻烃一般是指分子碳数为 C_5—C_{10}的化合物，是石油和天然气的重要组成部分。对轻烃的研究已有30多年的历史。20世纪80年代初，Hunt 就报导了汽油范围正构烷烃的来源。此后，随着轻烃形成机理研究的不断深入，轻烃参数在油气勘探中得到了广泛的应用，应用领域主要包括以下几个方面：(1)判别成因类型和成熟度，进行油气源的对比分析；(2)次生变化；(3)生物降解；(4)运移相态；(5)沉积环境；(6)原油裂解气与干酪根裂解气的判识和(7)储层的连通性等。

梨树断陷的天然气浓缩轻烃检测出来的轻烃可达 nC_9(图4－15)，但由于正庚烷以后的化合物由于在天然气中含量太低，并不利于检测，有的化合物甚至达不到检测限，因此本书所研究天然气的轻烃参数限于 C_{6-7}化合物。

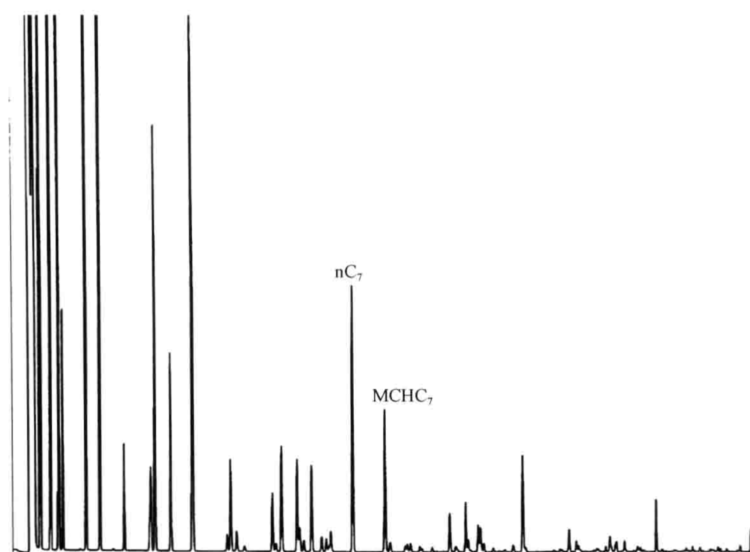


图4－15 梨树断陷 SW100 井 2085.3～2088.8m 层段天然气中的浓缩轻烃组成色谱图

正构烷烃、支链烷烃、环烷烃和芳香烃的相对组成往往反映了原油和天然气的母源、成熟度和二次蚀变信息。梨树断陷各油气田天然气样品的正构烷烃、支链烷烃、环烷烃和芳香烃的相对组成中，链烷烃(含正构烷烃和支链烷烃)在各天然气样品中占绝对优势，芳香烃含量则普遍较低，除北部斜坡带的 L2 井 C_{6-7}芳香烃含量可达16.1%外，其余样品的均 C_{6-7}芳香烃含量小于10%。

北部斜坡带苏家屯地区 L2 井天然气正构烷烃含量最低，仅32.7%，支链轻烃含量也较低，为29.5%，与此相对应的是，其芳香烃含量为梨树断陷最高，达16.1%。皮家气田天然气的组成彼此间变化不大，典型以链烷烃为主，环烷烃和芳香烃含量较低，其正构烷烃、支链烷烃、环烷烃和芳香烃含量分别在40.4%～44.8%、28.5%～36.4%、16.8%～22.5%和3.5%～6.3%之间变化。

中央构造带上八屋油气田天然气的族组成相对较一致，以链烷烃为主，环烷烃和芳香烃含量偏低，具体其正构烷烃含量介于35.6%～41.6%之间，支链烷烃介于35.3%～49.5%之间，

链烷烃含量占到天然气总组成的70%以上，环烷烃含量介于11.7%～19.8%之间，芳香烃含量则介于0.1%～8.4%之间。

与其气态烃组成、碳同位素组成相一致，四五家子地区2个天然气样品在C_{6-7}族组成之间仍存在较大差异，主要表现在正构烷烃和环烷烃的相对含量上，W180井富含正构烷烃而贫环烷烃，W162井则相反，可能体现这2个样品在成因和成熟度上的差异。

后五家户气田天然气的族组成也相对一致，与八屋油气田相似，仍以链烷烃占绝对优势，芳香烃含量更低，其正构烷烃含量介于45.8%～51.3%之间，支链烷烃介于32.6%～36.3%之间，链烷烃含量占到天然气总组成的80%以上，环烷烃含量介于11.4%～15.7%之间，芳香烃含量则介于2.9%～4.4%之间。

孤家子气田天然气的族组成变化较大，其正构烷烃含量介于30.4%～56.1%之间，支链烷烃介于33.3%～49.3%之间，链烷烃含量也占到天然气总组成的70%以上，GK4井甚至达到92.6%；环烷烃含量介于6.8%～19.2%之间，芳香烃含量则介于0.6%～7.8%之间。

东南斜坡带李家屯地区HS2井和金山L6井天然气样品均以链烷烃为主，芳香烃含量最低。与HS2井邻近的新立油气田3个天然气样品的族组成非常相似，也都是富含正构烷烃和支链烷烃，链烷烃含量在85%以上，相对贫环烷烃，芳香烃含量极低。相对于HS2井和L6井，其链烷烃含量更高，芳香烃含量更低。

梨树断陷不同油气田C_6—C_7轻烃的无环链烷烃、环烷烃和芳香烃的相对组成见图4－16。由图中可看出，梨树断陷天然气普遍贫芳香烃，除北部斜坡带L2井天然气稍微富含芳香烃，芳香烃含量达16.1%外，其余样品均＜10%，饱和烃中则富含链烷烃、贫环烷烃。总体看来，不同构造区链烷烃的相对丰度有差异，其链烷烃含量丰度顺序为：东南斜坡带新立气田＞中央构造带＞北部斜坡带＞L6井。四五家子油气田2口井天然气的轻烃组成有较大差异，W162井天然气环烷烃含量较高，达34%。

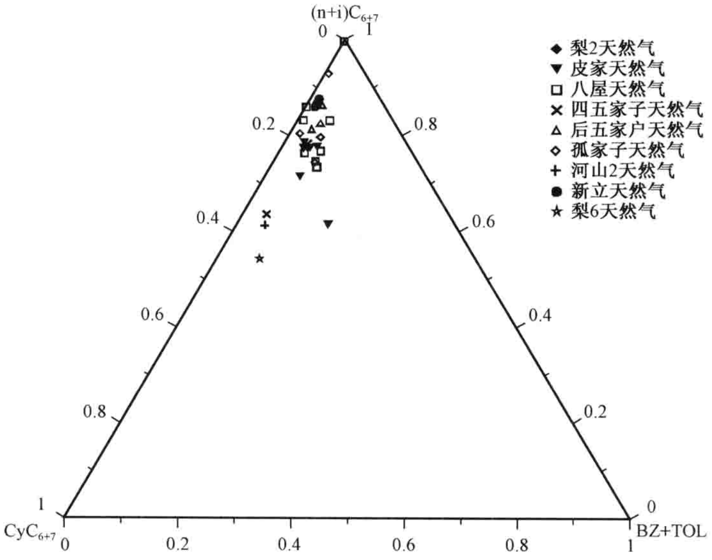


图4－16　不同油气田天然气样品C_{6+7}链烷烃、环烷烃、芳香烃的相对组成图

从不同油气田天然气 C_6—C_7 正构烷烃、支链烷烃和环烷烃的相对组成图（图4－17）可看出，正构烷烃和支链烷烃的相对含量在不同油气田间有差异。相对来说，绝大部分样品间的正构烷烃和链烷烃相对含量变化较小，环烷烃相对含量变化较大，各油气田变化顺序为东南斜坡带金山地区 L6 井、李家屯 HS2 井、四五家子油气田 W162 井 > 北部斜坡带、中央构造带八屋油气田 > 中央构造带后五家户油气田、东南斜坡带新立油气田。孤家子气田分布较分散，一方面 GK33 井具有较高的异构烷烃含量，另一方面 GK4 井则具有最高的正构烷烃含量。

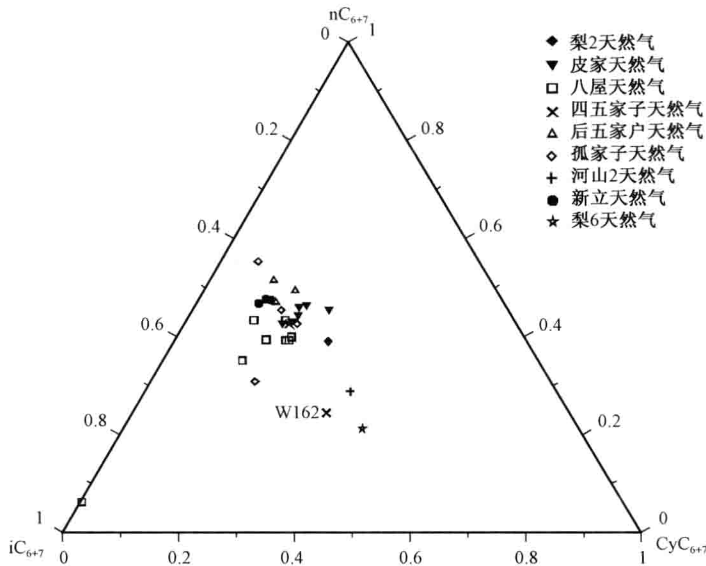


图4－17　不同油气田天然气样品 C_{6+7} 正构烷烃、支链烷烃和环烷烃的相对组成图

从图4－16和图4－17来看，东南斜坡带李家屯地区 HS2 井、金山地区 L6 井，中央构造带四五家子油气田 W162 井和北部斜坡带 L2 井与其他样品差异较大，可能反映了母质类型和成熟度以及成藏史的差异。

早在20世纪80年代，Thompson 就推出了一系列 C_6—C_7 轻烃指标，如 *I*、*R*、*U*、庚烷值（HI）和异庚烷值（PI）等。这些指标有的与干酪根类型和成熟度有关，有的与油气运移过程有关，大多数都会受到二次油藏蚀变的影响。图4－18为 *I*—*R* 交会图，其中 *I* 为（2＋3）MC6/（1，3＋1t2）DMCC5，*R* 则为 nC7/2MC6，Thompson 认为这2个指标与油气来源相关。从图中可看出，梨树断陷不同油气田的 I 比值存在较大差别，除孤家子气田较分散外，其他油气田样品都较为集中。总体来看，东南斜坡的深层天然气样品 HS2 井、L6 井样品具有较低的 *I* 和 *R* 值，而中央构造带的新立油气田、后五家户油气田和孤家子气田的 GK18 井的天然气样品则具有较高的 *I*、*R* 值；其他样品相对较集中，且八屋油气田和皮家气田均表现为 *I* 值相对变化幅度小，*R* 值相对变化幅度大。孤家子气田的 GK4 井具有梨树断陷最高的 *I* 值，可能与天然气中轻烃成因有关。

Thompson（1983）利用庚烷值和异庚烷值交汇图判断油气的来源、成熟度和生物降解作用。梨树断陷区天然气轻烃的异庚烷值多数较高（图4－19），仅有四五家子地区的 W162 井天然气落于成熟区域，其他样品均落在高熟或过成熟区域。北部斜坡带的皮家气田和 L2 井的庚烷指数和异庚烷指数相接近，主要位于脂族曲线附近，除 PK139－1 井 1860.6～2105.2m 的

营城组样品落于高成熟区外，余者皆位于过成熟区。中央构造带从四五家子油气田到八屋油气田到孤家子、后五家户油气田，其庚烷指数和异庚烷指数呈上升趋势，且大部分样品均位于脂族曲线附近，表征了成熟度增加的变化趋势。孤家子气田样品较分散，其中 GK33 井具有最低的庚烷值，为 16.4，GK4 井则具有梨树断陷最高的庚烷值，为 59。东南斜坡带上，新立油气田的庚烷值与异庚烷值较其邻近的 HS2 井和盆地南缘的 L6 井高，可能表征了成熟度差异。

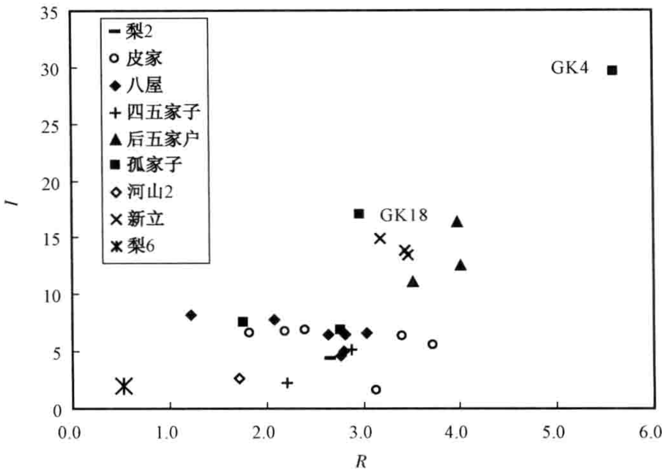


图 4-18　不同油气田天然气样品 I—R 交会图

I:(2+3)MC_6/(1,3+1t2)$DMCC_5$;R:nC_7/2MC_6

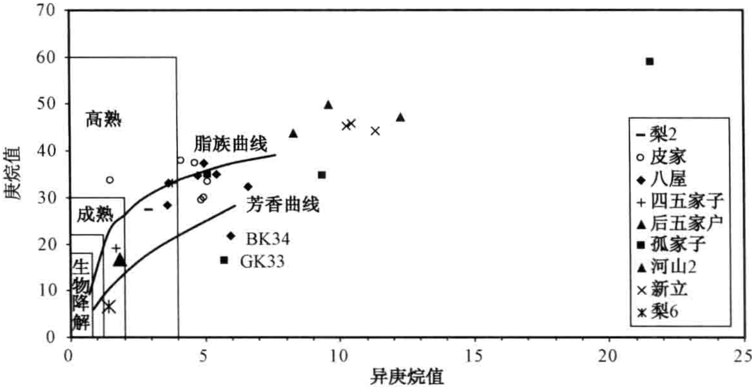


图 4-19　不同油气田天然气轻烃的庚烷值和异庚烷值变化图

1987 年，Mango 首次报道了石油中 4 个异庚烷化合物——2-甲基己烷（2-MH）、2,3-二甲基戊烷（2,3-DMP）、3-甲基己烷（3-MH）、2,4-二甲基戊烷（2,4-DMP），其绝对浓度的比值显示出惊人的不变性，并用 K_1 表示为 K_1 =（2-MH+2,3-DMP3）/（3-MH+2,4-DMP）。其后，Mango 又用稳态催化过程来阐述石油中 C_7 轻烃的成因，并提出了 C_7 烃类形成的动力学模式图。在此基础上，Mango（1990）利用 P_3 与（P_2+N_2）、P_2 在 C_7 烃类中的百分含量与 N_2/P_3 关系图，对 Sabine 和 Midland 油田原油进行对比与分类，收到了令人满意的效果。

随着研究地区和样品量的日益增加，人们发现 K_1 并不是一个约等于 1.0 的常数，它存在着一定的变化。例如 Mango(1990)发现，Sabine 油田原油 K_1 值为 1.09，而 Midland 油田原油 K_1 值为 0.786；Ten Haven(1996)发现阿根廷西北部一个白垩系盆地原油 K_1 值高达 1.67。塔里木盆地 540 个原油样品 K_1 值分布范围为 0.74～1.54，不同地区不同类型原油的 K_1 值分布有所不同(张敏，1998)。导致 K_1 值变化的主要原因可能是不同地区烃源岩沉积介质中酸性催化剂催化作用的强弱不同。

总体来看，梨树断陷不同油气田的天然气的 K_1 值基本保持稳定，(3MH+2,4DMP)/(2-MH+2,3DMP)比值基本介于 0.79～1.03 之间，SN100 井和 GK33 井的稍高，为 1.16 和 1.25(图 4-20a)。平面上，K_1 值的分布略有差异，东南斜坡的 L2 井和皮家气田的 K_1 值介于 0.79～0.89，其中 PK2 井 K_1 值略低，为 0.79，余者介于 0.86～0.89 之间，反映其气源可能较一致。中央构造带天然气样品的 K_1 值略高，除 2 个最高值外，余者介于 0.81～1.03 之间。东南斜坡带的 HS2 井、L6 井和新立油气田的天然气样品 K_1 值则介于 0.87～0.96，其中新立油气田的 3 个样品的 K_1 值一致性很强，为 0.95～0.96，寓示这 3 个样品的相似性。

K_2 值相对 K_1 值则变化较大，部分油气田内部变化也较大。北部斜坡带的 L2 井和皮家气田的天然气样品的 K_2 值很接近，介于 0.30～0.39 之间。中央构造带上则 K_2 值变化较大，总体介于 0.25～0.64 之间，其中八屋油气田的 BK60-10 井、BK61-4 井、SW100 井 K_2 值比较接近，约为 0.34，SN98 和 BD2 井 K_2 值约为 0.40，BK34 和 SN100 井 K_2 值较大，分别为 0.55 和 0.61；四五家子油气田为 0.34 和 0.38；后五家户油气田的 HD20-18 和 HD26-17 井 K_2 值较为接近，为 0.27 左右，HD28-18 井 K_2 值与之差别较大，为 0.45；孤家子气田则是 GK21 井和 GK4 井 K_2 值约为 0.45，GK33 井和 GK18 井 K_2 值为 0.65。东南斜坡带上 HS2 井和 L6 井 K_2 值相接近，分别为 0.56 和 0.50；新立油气田则较低，K_2 值范围为 0.34～0.36(图 4-20b)。

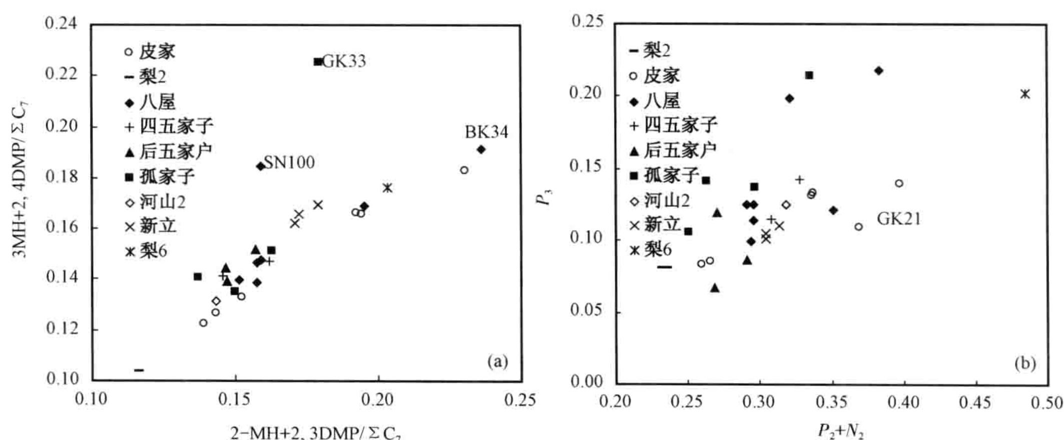


图 4-20　不同油气田天然气的 K_1、K_2 值变化图

同样由 Mango 轻烃参数衍生出来的指标——$P_2/(N_2/P_3)$，也可用于天然气和原油分类，图 4-21 可看出，梨树断陷天然气样品的 $P_2/(N_2/P_3)$ 比值较分散，且无明显的分组，除中央构造带的后五家户油气田和东南斜坡带新立油气田分布较集中，反映这 2 个油气田天然气中的轻烃可能成因较单一外，余者均较分散，对天然气分类意义不大。

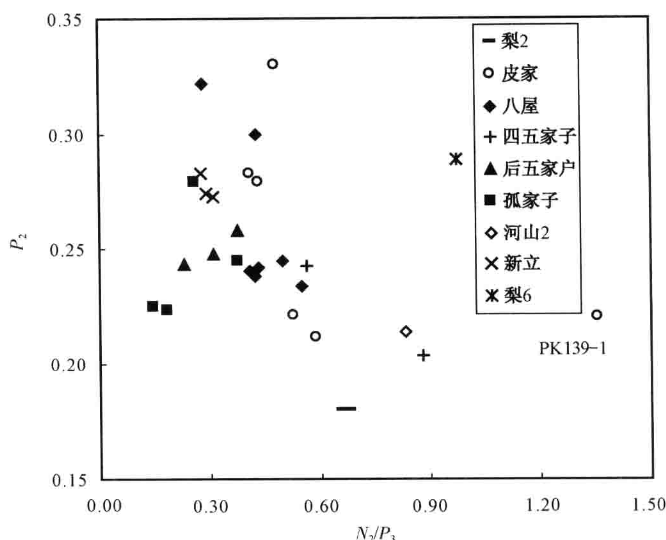


图 4－21　不同油气田天然气的 P_2、N_2/P_3 交会图

第四节　天然气成因类型

一、非烃气体成因

前文已述及，梨树断陷天然气中的非烃气体主要是 CO_2 和 N_2。非烃气体以 N_2 为主，含量介于 1.56% ~7.88% 之间，CO_2 含量极低，普遍 <1.0%，部分样品中甚至检测不到 CO_2 气体，在孤家子气田、新立和后五家户油气田尤为明显，即除斜坡带的 L2 井、皮家气田，中央构造带的八屋油气田、四五家子油气田和东南斜坡带的 L6 井和 HS2 井略含 CO_2 外，其他样品几乎均不含 CO_2。除 HS2 井外，其余样品非烃中的 CO_2 含量与重烃含量有相同的变化趋势，即 CO_2 含量相对较高时，重烃含量也较高时；当 CO_2 含量低，甚至检测不出时，其重烃含量也相对较低（图 4－22），可能说明了 CO_2 气体与重烃气体成因相同或相似。

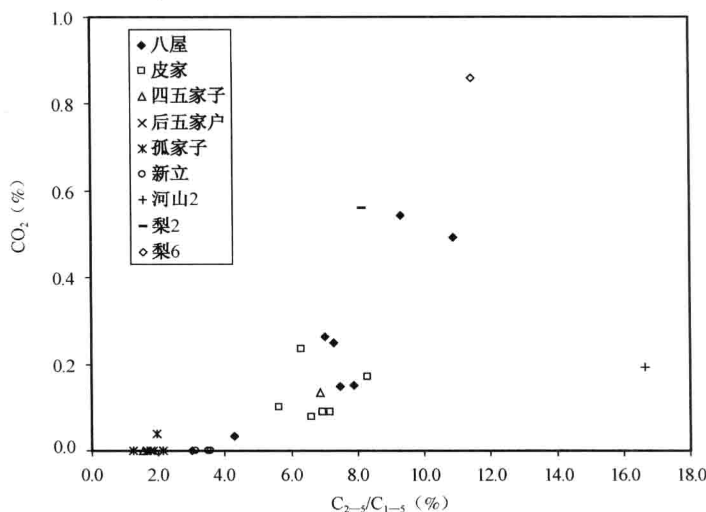


图 4－22　梨树断陷天然气 CO_2 含量与湿度相关性图

戴金星提出利用 CO_2 的丰度和碳同位素判断 CO_2 的来源，当 CO_2 含量 < 20%，且 $\delta^{13}C_{CO_2} < -10‰$，则可认为 CO_2 是有机质经生物作用、热化学作用或氧化作用形成的；当 $\delta^{13}C_{CO_2} > -10‰$，且 CO_2 天然气中氦的同位素比值（$^3He/^4He$）介于 $10^{-9} \sim 10^{-8}$ 之间时，则认为 CO_2 是由碳酸盐受热分解生成的；当 $\delta^{13}C_{CO_2} > -10‰$，且 $^3He/^4He$ 比值介于 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 之间时，则认为 CO_2 是来源于上地幔的，并绘制了 CO_2 判识图版。梨树断陷的 CO_2 落在图版的Ⅰ区和Ⅲ区，即有机成因和有机成因与无机成因共存区，同时梨树断陷 CO_2 含量均很低，<1%（图 4-23），因此可认为梨树断陷的 CO_2 是有机成因的。

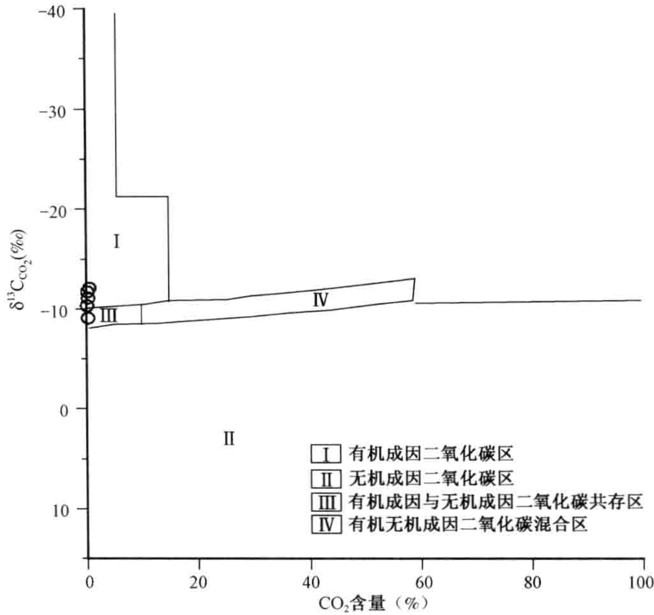


图 4-23　梨树断陷天然气中 CO_2 浓度与 $\delta^{13}C_{CO_2}$ 相关性图

二、稀有气体成因

稀有气体的同位素组成和相对大气的含量可以表征其来源。^3He 主要存在于地幔的原始氦，是地球形成时从宇宙星云带来的，而 ^4He 则是放射性成因的。大气氦的 $^3He/^4He$ 比值是 1.39×10^{-6}（Ra），上地幔氦组分的 $^3He/^4He$ 正常值是 1.2×10^{-5}，下地幔的更高，壳源氦的典型值在 10^{-8}，即 $(1 \sim 3) \times 10^{-8}$（戴金星，1992）。戴金星（1992）指出，凡 R/Ra > 1 的氦有幔源氦的输入。$^{40}Ar/^{36}Ar$ 值是天然气地质学中研究和应用比较多的氩同位素指标，通常用 $^{40}Ar/^{36}Ar = 295.5$ 作为大气氩的表征值。当 $^{40}Ar/^{36}Ar > 295.5$，则认为是放射成因的。由于年代累积效应，年代老的烃源岩形成的煤成气，$^{40}Ar/^{36}Ar$ 值大约在 800 ~ 1000 的范围，甚至更大，而年代新的烃源岩形成的油型气，$^{40}Ar/^{36}Ar$ 一般在 400 左右，介于两者之间的为混合气（徐永昌，1985）。Kaneoka 等认为，$^3He/^4He$ 值比大气值高的样品与地幔物质有关，上地幔中 $^3He/^4He$ 值较均一，为 $(1 \sim 1.4) \times 10^{-5}$，$^{40}Ar/^{36}Ar$ 值相对较高（>2000）。

表 4-1 为梨树断陷天然气的稀有气体同位素组成。从表中可看出，天然气的 $^3He/^4He$ 介于 $(0.10 \sim 2.48) \times 10^{-6}$ 之间，其中 BK16 井和 BK20-2 井天然气的 $^3He/^4He$ 较高，大于 2.0×10^{-6}，余者皆小于 2.0×10^{-6}。说明梨树断陷天然气中的氦应有幔源氦的混入。R/Ra 比值则介于 0.07 ~ 1.77 之间，八屋油气田的 3 个样品和后五家户气田的 SN83 井天然气的 R/Ra 均大于 1，也表征了幔源氦的输入。

表 4-1 梨树断陷天然气稀有气体同位素组成特征表

地区	样品	层位	深度(m)	$^3He/^4He(\times10^{-6})$	R/Ra	$^{40}Ar/^{36}Ar$
后五家户	HK31	K_1d	1770~1830	1.04	0.74	370
	LS1	K_1sh	4299~4303	0.10	0.07	295.8
	SN83	K_1q	1296~1298.5	1.62	1.16	297
八屋	BK16	K_1yc	1758~1805	2.16	1.54	1268
	BK20-2	K_1sh	2075~2107	2.48	1.77	1194
	SN165	J_3h	2360~2406	1.89	1.35	1050
秦家屯	SN105	K_1sh	1887.5~1996.9	0.76	0.54	764

从$^{40}Ar/^{36}Ar$值来看,除后五家户气田的LS1井和SN83井接近295.5,可能表征大气氩的混入;但HK31井的$^{40}Ar/^{36}Ar$为370,接近400,说明其形成年代比较新;八屋油气田天然气样品$^{40}Ar/^{36}Ar$均大于1000,说明其形成年代较早,或者有无机成因气体的输入。秦家屯一个天然气样品的$^{40}Ar/^{36}Ar$值为764,表征其天然气中的氩可能来源与较老烃源岩或放射氩与幔源氩的混合。

利用氦、氩同位素可将天然气中的氦氩分成两种成因类型(徐永昌,2003),A区为壳—幔复合型,主要分布在我国东部活动地区,B区则为典型的壳源天然气,主要分布在稳定、亚稳定及活动区中相对稳定的地区,随年代变老,$^{40}Ar/^{36}Ar$比值增大,$^3He/^4He$比值降低。梨树断陷天然气的$^3He/^4He$和$^{40}Ar/^{36}Ar$值分布见图4-24,由图可见,虽然不同油气田的$^{40}Ar/^{36}Ar$值变化较大,但总体均位于B区,即氦、氩是壳源,而且是稳定、亚稳定及活动区中相对稳定的地区。它们的$^3He/^4He$值都在$n\times10^{-7}$左右,相对而言,后五家户气田样品的$^{40}Ar/^{36}Ar$值更接近大气值,八屋油气田则具有较高的$^{40}Ar/^{36}Ar$值,可能反映了年代的不同。

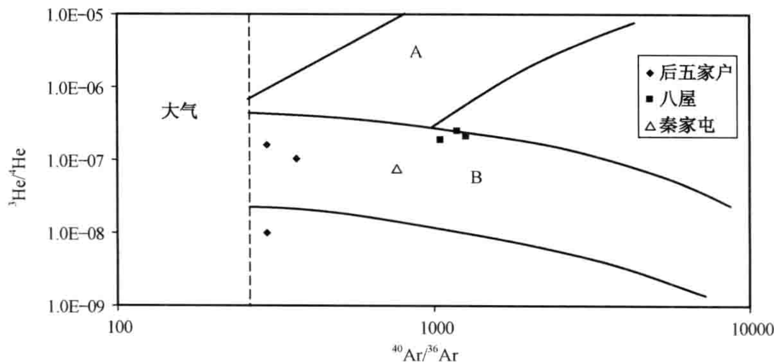


图4-24 梨树断陷天然气$^3He/^4He$和$^{40}Ar/^{36}Ar$值分布图

三、烃类气体成因与成熟度

总的来说,梨树断陷天然气样品的甲烷碳同位素变化较大(图4-25),$\delta^{13}C_1$介于-45.6‰~-21.8‰;乙烷和丙烷碳同位素变化较小,$\delta^{13}C_2$介于-32.5‰~-25.2‰,$\delta^{13}C_3$介于-31.6‰~-25.2‰,总体上$\delta^{13}C_1<\delta^{13}C_2<\delta^{13}C_3$,呈正碳系列。烷烃气分子依碳数递增,$\delta^{13}C$值依次递增者称为正碳同位素系列;$\delta^{13}C$值依次递减者称为负碳同位素系列。所谓烷烃气碳同位素系列是指烷烷烃气分子中碳数顺序递增,$\delta^{13}C$值依次递增或递减。递增者称正碳同位素系列,递减者叫负碳同位素系列。当烷烃气的$\delta^{13}C$值不按正、负碳同位素系列规

律，排列出现混乱时，谓之碳同位素系列倒转（戴金星，2003）。有机成因原生烷烃气的碳同位素系列为正碳同位素系列；无机成因原生烷烃气的碳同位素系列为负碳同位素系列（戴金星，1993）。因此，梨树断陷天然气总体上为有机成因气。

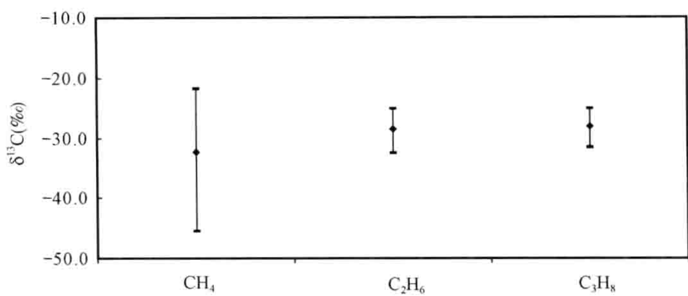


图 4－25　梨树断陷天然气中甲、乙、丙烷碳同位素总体分布图

天然气的化学组成和同位素组成会随运移距离和成熟度的变化而发生规律性的变化，通常来说，随着运移距离的增加，半径小的分子组成相对增加，因此，C_1/C_{1-5}、C_2/C_3 和 iC_4/nC_4 比值随运移距离增加而加大。随天然气成熟度增加，低分子量化合物含量增加，因此，这三个比值同样随成熟度升高而加大。就碳同位素组成来看，随着成熟度的增加，天然气的碳同位素变重。图 4－26 为梨树断陷天然气的分子组成和甲烷碳同位素组成在不同层位的分布。总体上，C_1/C_{1-5}随层位变浅而加大，C_2/C_3 和甲烷碳同位素也有相似的变化趋势，但 iC_4/nC_4 变化不明显。从图中可看出，不同油气田天然气的化学组成和碳同位素组成随层位变化规律不同。北部斜坡带苏家屯 L2 井和皮家气田的天然气样品所取样品层位均为营城组，除干燥系数的相似性很高外，L2 井样品 C_2/C_3 和 iC_4/nC_4 比值与皮家气田的天然气样品存在一定差异，甲烷碳同位素组成差异较大，表明 L2 井与皮家气田的营城组天然气在成因、成熟度或聚集成藏上是不同的。

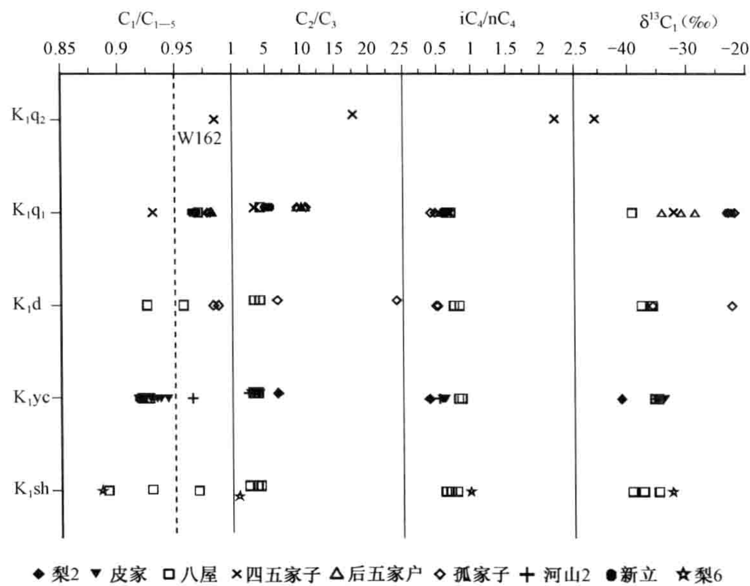


图 4－26　不同油气田天然气 C_1/C_{1-5}、C_2/C_3 和 iC_4/nC_4 比值及 $\delta^{13}C_1$ 在不同层位的分布图

中央构造带天然气样品所涉及的层位较多，从沙河子组到泉头组均有采样。总体看来，整个中央构造带的天然气样品的 C_1/C_{1-5}、C_2/C_3 随层位变浅，其比值有增加的趋势；除 W162 井外，$\delta^{13}C_1$ 随埋深变浅有变重的趋势，且差异较大，暗示甲烷碳同位素的这种变化可能并不是运移分馏效应造成的，而与天然气成因和成熟度有关。其中变化最明显的是四五家子油气田的 2 个样品，W162 井和 W180 井样品虽然均取自浅层的泉头组，但其层位分别为上段和下段，天然气的 C_1/C_{1-5}、C_2/C_3 和 iC_4/nC_4 随层位变浅，比值明显加大，可能表征了天然气运移距离的增加，而上层天然气甲烷碳同位素明显较下层轻，可能象征着上层天然气为早期生成的天然气或者有生物气或较低成熟度天然气的输入。

东南斜坡带的新立油气田的样品均采自泉头组下段，从图 4 - 26 中可看出，这 3 个样品之间极其相似，但与同样来自泉头组下段的 W180 井及孤家子和后五家户地区样品有较大差异。李家屯地区 HS2 井天然气样品取自营城组，金山地区 L6 井样品取自沙河子组，从图 4 - 26 中可看出，随层位变浅，C_1/C_{1-5}、C_2/C_3 比值明显加大，iC_4/nC_4 比值则减小，表明这些指标差异可能并不是反映运移的影响。

Francois Lorant 等人比较了无水封闭和开放系统的热模拟实验结果，发现模拟体系不同，烃类气体碳同位素的演化趋势不同，烃类气体的演化趋势与热成熟度和排烃速率有关。将梨树断陷天然气中的乙烷和丙烷的化学组成与碳同位素组成与 Lorant 建立的天然气碳同位素演变趋势相比较（图 4 - 27）可发现，除个别样品外，北部斜坡带的皮家气田和苏家屯地区 L2 井天然气样品均落在原油二次裂解区表明这些天然气可能是原油裂解气；中央构造带的样品则似乎可以分为两类，一类包括八屋油气田和四五家子油气田的 W180 井处于干酪根初次裂解和二次裂解的中间区域，大部分位于二次裂解区，反映其基本相当于封闭体系下的原油裂解气，而孤家子和后五家户地区则主要位于开放体系趋势范畴，似乎表明这些天然气样品有着不同的成因机理。东南斜坡带金山地区 L6 井和李家屯地区 HS2 井主要位于初次降解区，表征其成熟度并不太高，新立气田样品则位于开放体系趋势，暗示其天然气成因的不同。

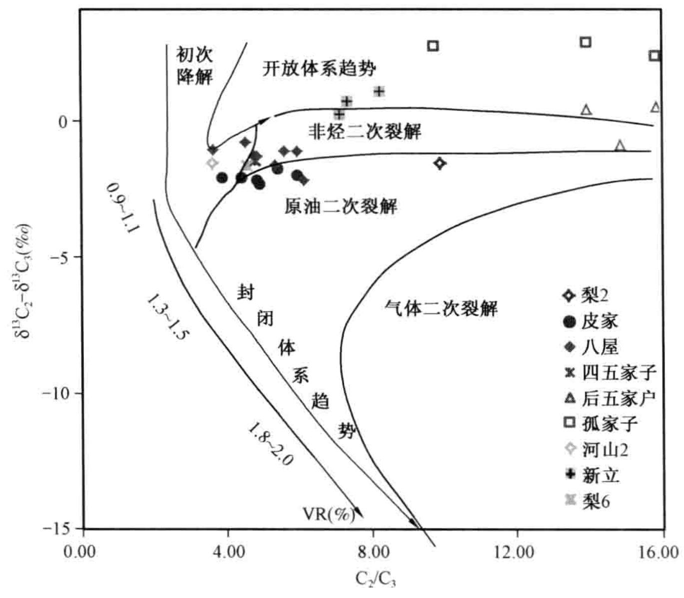


图 4 - 27　梨树断陷天然气中乙烷、丙烷的化学组成和碳同位素组成关系图

由前文可知，梨树断陷天然气样品的化学组成和同位素组成非均质性很强，单个油气田内亦如是。因此，对单个油气田展开系统剖析将有助于判断天然气成因和成熟度，为气源对比提供支撑。

(一)北部斜坡带

北部斜坡带苏家屯地区L2井和皮家气田所产天然气样品的烃类气体的碳同位素呈现明显的正碳同位素系列规律(图4-28)，即 $\delta^{13}C_1 < \delta^{13}C_2 < \delta^{13}C_3$，表征天然气的有机成因，仅在高碳数时，部分样品的丙烷和丁烷碳同位素出现了一定程度的反转。致使天然气碳同位素系列出现倒转一般有如下原因：有机烷烃气和无机烷烃气的混合；煤成气和油型气的混合；同型不同源气或同源不同期气的混合和烷烃气中某一或某些组分被细菌氧化。倒转可由其中一种原因，也可由两种或更多种原因所致(戴金星，2003)。北部斜坡带的天然气样品仅在高碳数部分出现了倒转，因此可排除无机成因气与有机成因气的混合的原因。即 $\delta^{13}C_1 < \delta^{13}C_2 < \delta^{13}C_3$ 甲烷及其同系物可由于细菌作用而发生氧化或降解，菌种不同，被氧化降解的组分也不同，当某种组分被降解氧化时，该组分被消耗，剩余组分的 $\delta^{13}C$ 值变重(戴金星，2003)。烃类化合物在发生生物降解时，首先被消耗的是正构烷烃，其次才是支链烷烃(Peters，2005)，因此可用 iC_n/nC_n 来表征生物降解作用。从北部斜坡天然气样品的化学组成来看，低碳数气态烷烃以甲烷为主，体积百分含量介于88.9%～93.3%之间，而其他气态烃的含量则明显随碳数增加而降低，呈现正常分布，其 iC_4/nC_4 比值均低于1(表4-2)，说明正烷烃并没有出现消耗，即该区天然气样品没有遭受生物降解的次生蚀变作用。也就是说，造成皮家气田天然气碳同位素倒转的原因应是油型气与煤成气的混合或同源不同期的天然气的混合。

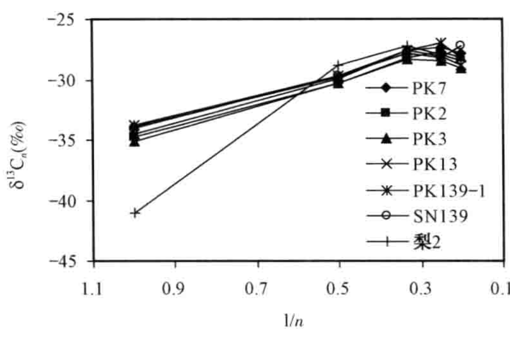


图4-28 皮家气田天然气碳同位素组成与碳数倒数的相关性图

表4-2 皮家气田天然气化学组成参数表

井号	深度(m)	层位	化学组成(%)					iC_4/nC_4
			C_1	C_2	C_3	iC_4	nC_4	
PK7	1917.2～1961.9	K_1yc	90.16	4.58	1.38	0.22	0.37	0.59
PK2	2008.5～2028	K_1yc	88.90	4.96	1.87	0.32	0.57	0.56
PK3	2125～2165.8	K_1yc	91.87	4.54	1.12	0.15	0.25	0.61
PK13	2104～2221	K_1yc	90.60	4.28	1.28	0.23	0.40	0.57
PK139-1	1860.6～2105.2	K_1yc	89.93	4.55	1.50	0.24	0.42	0.56
SN139	2068.8～2110.8	K_1yc	92.34	3.81	1.03	0.19	0.31	0.60
梨2	2823.2～2825.1	K_1yc	90.60	6.55	0.97	0.10	0.26	0.38

天然气单体烃碳同位素的组成与其碳数的倒数成线性相关，并依此可判断天然气是否单一来源(Chung，1988)。图4-28中无论是皮家气田还是L2井的单体烃碳同位素与其碳数倒数均不成线性关系，表明天然气中的烃类气体并不是单一来源。

烷烃气的母质类型不同,其碳同位素组成不同,戴金星综合利用国内外1515个有机不同成因天然气碳同位素数据编制出V形鉴别图,从图4-29可看出,皮家气田和L2井天然气样品的同位素组成虽然有明显差异,但均落在Ⅱ区,表征其油型气来源基本一致,碳同位素差异可能源于成熟度差异。同时利用天然气的化学组成和碳同位素组成的$\delta^{13}C_1$—C_1/C_{2+3}有机不同成因烷烃鉴别图版(图4-30)上,皮家气田落于$Ⅲ^2$区,即凝析油伴生气和煤成气区域,结合

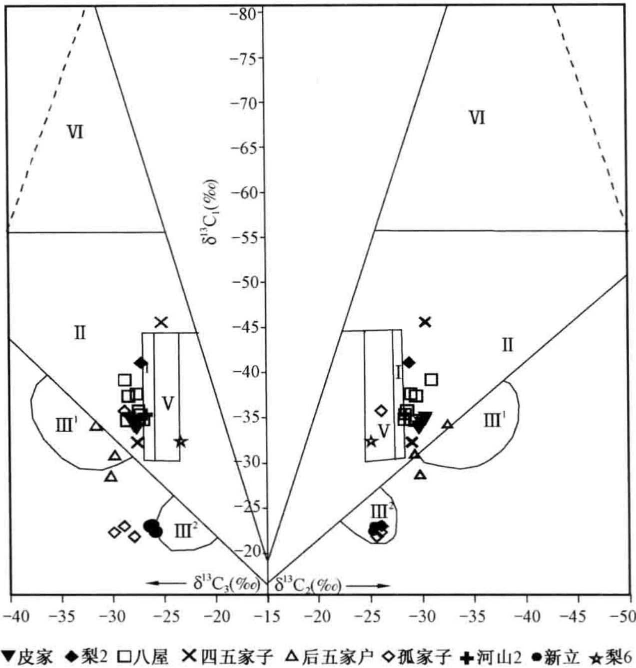


图4-29 梨树断陷天然气$\delta^{13}C_1$—$\delta^{13}C_2$—$\delta^{13}C_3$有机不同成因烷烃气鉴别图

Ⅰ—煤型气区;Ⅱ—油型气区;Ⅲ—碳同位素系列倒转混合气区;

Ⅳ—煤型气和油型气区;Ⅴ—煤型气、油型气和混合气区;Ⅵ—生物气和混合气区

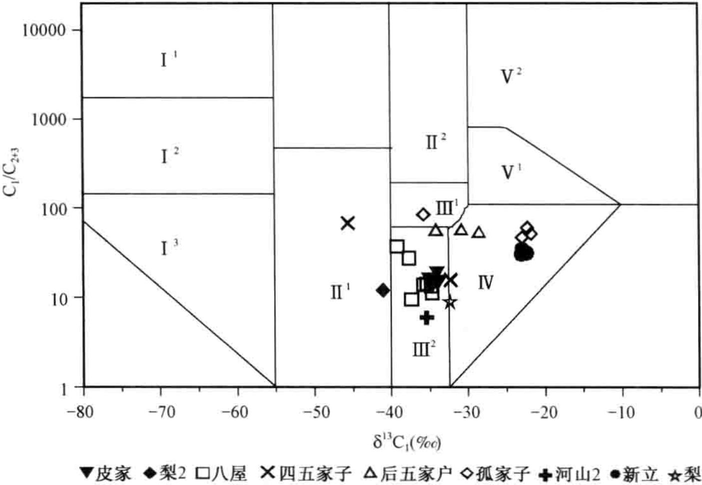


图4-30 梨树断陷天然气$\delta^{13}C_1$—C_1/C_{2+3}不同成因烷烃气鉴别图

$Ⅰ^1$—生物气;$Ⅰ^2$—生物气和亚生物气;$Ⅰ^3$—亚生物气;$Ⅱ^1$—原油伴生气;$Ⅱ^2$—油型裂解气;

$Ⅲ^1$—油型裂解气和煤成气;$Ⅲ^2$—凝析油伴生气和煤成气;Ⅳ—煤成气;$Ⅴ^1$—无机气;$Ⅴ^2$—无机气和煤成气

图4－29可知皮家气田天然气为凝析油伴生气。至于L2井营城组天然气则落于Ⅱ[1]区，即原油伴生气区，说明L2井天然气成熟度比皮家气田略低。北部斜坡7个样品均采自营城组，但L2井埋深明显较其他样品深，说明了该区天然气聚集成藏的复杂性。

在没有次生作用的情况下，烷烃气的碳同位素同时受母源有机质类型和热成熟度控制，Bernar和Faber（1988）提出腐泥型母质来源甲烷、乙烷和丙烷与其母源热成熟度参数 R_o 之间的关系式分别为：

$$\delta^{13}C_1 = 15.4\lg R_o - 41.3; \quad (4-1)$$

$$\delta^{13}C_2 = 22.6\lg R_o - 32.2; \quad (4-2)$$

$$\delta^{13}C_3 = 20.9\lg R_o - 29.7。 \quad (4-3)$$

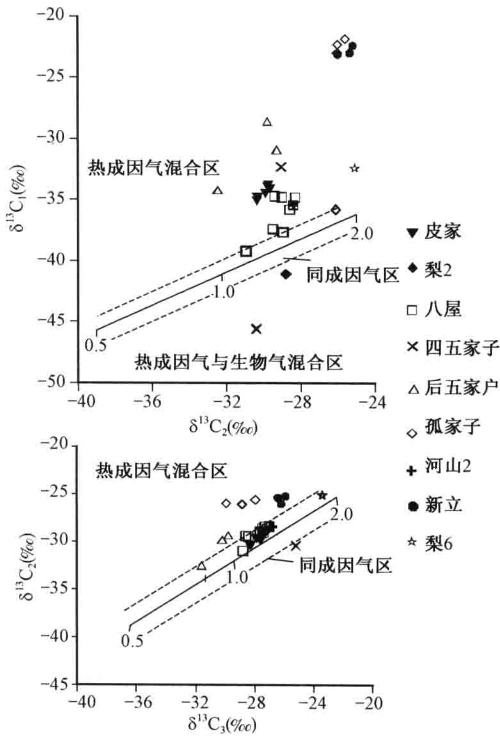


图4－31　梨树断陷天然气 $\delta^{13}C_1—\delta^{13}C_2—\delta^{13}C_3$ 同成因烷烃气鉴别图

并据此关系式提出了同成因腐泥型天然气的判别图版。从图4－31可看出，对于北部斜坡带所产出的天然气来说，从 $\delta^{13}C_2—\delta^{13}C_3$ 来看，样品基本落在同成因区域，说明乙烷和丙烷是混合成因的可能性较小，但是皮家气田和苏家屯地区L2井的天然气在 $\delta^{13}C_1—\delta^{13}C_2$ 图版上有显著差异，L2井的甲烷碳同位素相对于乙烷碳同位素偏轻，因此落于热成因气与生物气混合区，而皮家气田则甲烷碳同位素相对偏重，落于热成因气混合气区，说明两种天然气中的甲烷均非单一成因。

Stahl（1975）也根据Val Verde和Delaware盆地天然气的同位素组成提出了海相环境下生气有机质的成熟度预测公式：

$$\delta^{13}C_1 = 17\lg R_o - 42 \quad (4-4)$$

戴金星（1982）导出了我国油型气的回归公式：

$$\delta^{13}C_1 = 15.8\lg R_o - 42.2 \quad (4-5)$$

在对油型气，即腐泥型气推导出回归公式后，地球化学家们纷纷针对煤成气推导出了相应的回归公式。如Stahl（1975）根据西北欧和北美的天然气得到了煤成气的回归方程为：

$$\delta^{13}C_1 = 14\lg R_o - 28 \quad (4-6)$$

Claypool在研究北美天然气后，提出了煤成气回归方程为：

$$\delta^{13}C_1 = 15\lg R_o - 35 \quad (4-7)$$

戴金星研究了我国的天然气，建立了煤成甲烷、乙烷和丙烷的回归方程如下：

$$\delta^{13}C_1 = 14.12\lg R_o - 34.39 \quad (4-8)$$

$$\delta^{13}C_2 = 8.16\lg R_o - 25.71 \quad (4-9)$$

$$\delta^{13}C_1 = 7.12\lg R_o - 24.03 \qquad (4-10)$$

基于各烷烃气碳同位素组成和分子组成的油型气回归公式计算出皮家气田和苏家屯地区L2井天然气样品热成熟度，列于表4－3。由表中可看出，尽管回归公式有一定的差异，但基于甲烷碳同位素算出来的甲烷成熟度（R_o^1、R_o^4、R_o^5）相近，同时，这些依据 $\delta^{13}C_1$ 计算出的 R_o 值比据 $\delta^{13}C_2$（R_o^2）、$\delta^{13}C_3$（R_o^3）计算出来的 R_o 值有明显差异，皮家气田甲烷 R_o 值在2.53%～3.07%之间，属于过熟；而乙烷和丙烷计算成熟度相似，介于1.17%～1.29%之间，暗示皮家气田的气中的甲烷有煤层气或热成熟度偏高的油型气的贡献。而苏家屯L2井甲烷计算成熟度为1.1%，但乙烷和丙烷计算成熟度分别为1.32%和1.41%，暗示L2井天然气中的甲烷有低熟油型气的贡献。

表4－3　北部斜坡带天然气计算成熟度* 数据表

油气田	井位	深度	层位	R_o^1（%）	R_o^2（%）	R_o^3（%）	R_o^4（%）	R_o^5（%）
皮家气田	PK7	1917.2～1961.9	K_1yc	3.02	1.28	1.26	3.00	3.35
	PK2	2008.5～2028	K_1yc	2.64	1.21	1.17	2.65	2.94
	PK3	2125～2165.8	K_1yc	2.53	1.21	1.16	2.55	2.81
	PK13	2104～2221	K_1yc	2.77	1.26	1.26	2.77	3.08
	PK139－1	1860.6～2105.2	K_1yc	3.07	1.29	1.25	3.04	3.40
	SN139	2068.8～2110.8	K_1yc	2.95	1.29	1.22	2.93	3.28
苏家屯	梨2	2823.2～2825.1	K_1yc	1.03	1.41	1.32	1.13	1.17

* R_o^n 由回归公式（4－n）计算出，n：1，2，3，4，5。

Bernar（1995）对库克油页岩和木质煤进行了开放热裂解实验，结合实验数据和瑞利分馏模型建立了油气生成的动力学模型来描述有机质和轻烃的碳同位素分馏效应，与油田实例相吻合。由图4－32可看出，皮家气田和L2井天然气样品的乙、丙烷碳同位素组成与Bernar的同位素分馏模型相吻合，其 R_o 介于1.0%～1.4%之间，与表4－3中计算出来的乙烷、丙成熟度相吻合，但是皮家气田L2井的甲烷碳同位素值则分别位于分馏模型的上方和下方，表明了皮家气田天然气中可能有较高成熟度或煤成甲烷的混入，而苏家屯地区L2井则具较低成熟度甲烷的混入，即该区可能有多期生气排气史。

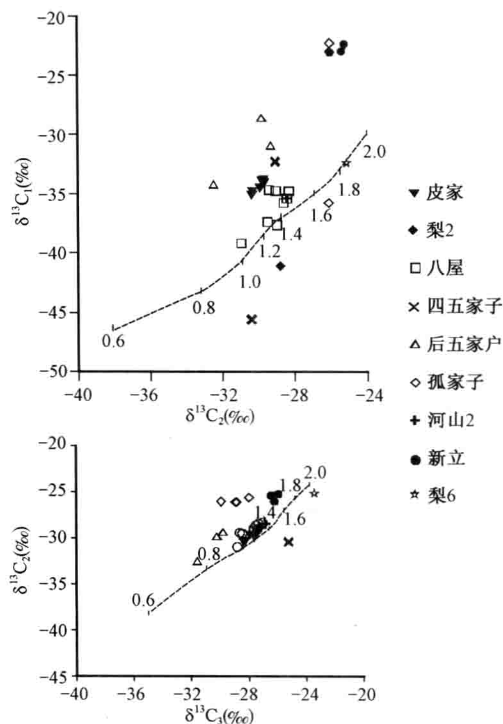


图4－32　梨树断陷天然气同位素组成与Bernar碳同位素分馏模型的对比图

Thompson（1987）发现正常的未经蚀变的原油的 nC_7/MCH（B）和 TOL/nC_7（F）两比值具有较为固定的变化范围。考虑到 nC_7/MCH 比值与母质来源、成熟度均有关系，Peters 等人（2005）认为该变化范围限定为：海相泥岩来源原油 F 值为0.4～1.5，海相碳酸盐岩的为0.4～

5.0+,煤系烃源岩的则为0.1~0.5。蒸发分馏作用最初使 F 值下降 B 值上升,然后则使 B 值快速上升,F 值则几乎不变;水洗作用使 B 值急剧降低;生物降解作用则使 B 和 F 均降低,成熟作用使 B 和 F 均升高。图4-33为梨树断陷天然气的 B—F 关系图,从图中可看出,梨树断陷天然气样品轻烃 F 值总体较高,除L6井 $F<0.5$ 以外,其余样品的 F 值均大于0.5,且绝大部分样品的 $F>1.5$,可能表征了海相碳酸盐岩烃源岩的贡献。总体上 F 值变化较大,即正庚烷与甲基环己烷的相对丰度变化较大,其变化趋势与图4-34中蒸发分馏效应的变化趋势相同,表明其 F 值一方面可能是母源性质差异造成,另外一方面也可能是受了蒸发分馏作用影响。值得注意的是,L2井虽然具有梨树断陷最高 B 值,达0.94,该数值表明L2井的 B 比值在Thompson原图中并不高,所以并不能代表L2井天然气样品具有较强的蒸发分馏作用。

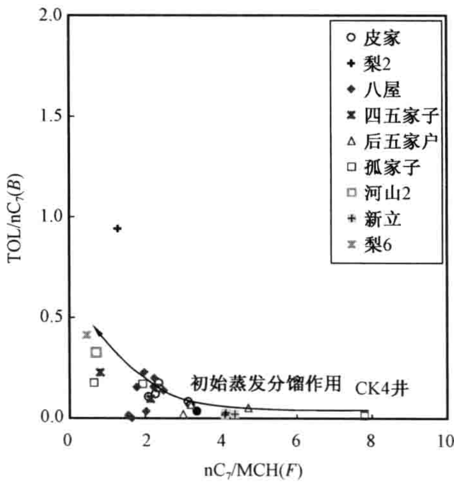


图4-33 梨树断陷天然气 B—F 关系图

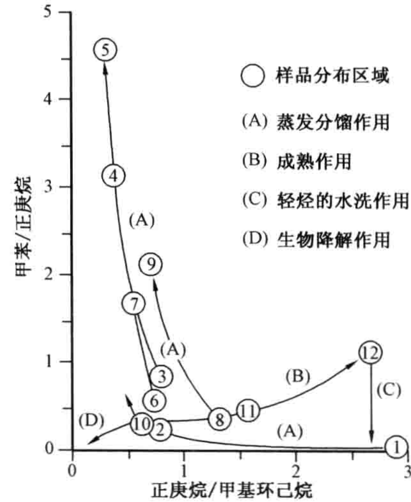


图4-34 四种次生蚀变总结图(Thompson,1987)

(二)中央构造带

中央构造带所取到的天然气样品涉及八屋油气田、四五家子油气田、后五家户油气田和孤家子油气田,下文将就单个油气田逐一论述。

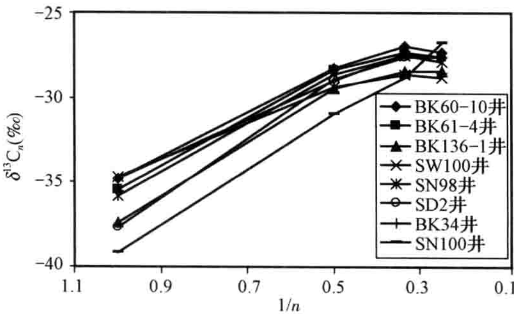


图4-35 八屋油气田天然气烃类样品碳同位素与碳数倒数的相关性图

1. 八屋油气田

总体来看,八屋油气田的甲、乙、丙烷的碳同位素呈现明显的正碳同位素系列规律,即 $\delta^{13}C_1<\delta^{13}C_2<\delta^{13}C_3$(图4-35),表明八屋油气田的天然气是有机成因气。从图中还可看出,SN100井的单体烃碳同位素变化与其他样品略有差异,其他样品在乙烷碳同位素处出现了较为明显的转折,暗示各单体烃来源的非单一性,而且SN100井的混合程度可能比其他样品低。

八屋油气田部分样品的高碳数部分出现碳同位素倒转(图4－29),即$\delta^{13}C_3 > \delta^{13}C_4$,倒转最明显的样品为BK34井。由于其甲、乙、丙烷碳同位素呈现明显的正碳系列,因此可排除无机成因气与有机成因气的混合的原因。表4－4为八屋油气田天然气的烷烃气体组成,从中可看出,八屋油气田气态烃化学组成呈正常态势,即$C_1(\%) \gg C_2 > C_3 > C_4$,同时,所有样品的正、异构烷烃的相对丰度均未出现异常,iC_4/nC_4比值均>1,因此,导致天然气出现倒转的原因可排除生物降解作用。也就是说,造成八屋油气田天然气碳同位素倒转的原因应是油型气与煤成气的混合或同源不同期的天然气的混合。

表4－4　八屋油气田天然气烃类化学组成及相关参数表

井号	深度(m)	层位	化学组成(%)					iC_4/nC_4
			C_1	C_2	C_3	iC_4	nC_4	
BK60－10	2099～2134.5	K_1yc	89.85	5.12	1.54	0.37	0.45	0.81
BK61－4	2074.2～2076.6	K_1yc	90.50	5.06	1.32	0.26	0.30	0.86
BK136－1	2283～2314	K_1sh	85.92	6.43	2.58	0.50	0.80	0.62
SW100	2085.3～2088.8	K_1sh	86.20	5.78	1.87	0.39	0.54	0.72
SN98	1516～1520	K_1d	90.15	5.20	1.28	0.28	0.34	0.82
BD2	1346～1356	K_1d	91.48	2.54	0.78	0.23	0.31	0.74
BK34	2245.6～2284	K_1sh	89.61	4.64	1.27	0.29	0.37	0.78
SN100	1146～1150.6	K_1q	92.50	2.00	0.48	0.10	0.15	0.69

在不同成因天然气碳同位素数据编制出V形鉴别图版(图4－29)上,八屋油气田的样品落在Ⅱ区,表征其油型气来源;而在天然气的$\delta^{13}C_1—C_1/C_{2+3}$有机不同成因烷烃鉴别图版(图4－30)上,八屋油气田的天然气样品正好落在$Ⅲ^2$区,正好是凝析油伴生气和煤成气区域,表征其母质腐泥型来源和较高热演化程度。

同成因腐泥型天然气的判别图版(图4－31)可看出,对于八屋油气田所产出的天然气来说,从$\delta^{13}C_2—\delta^{13}C_3$来看,样品基本落在同成因区域,说明乙烷和丙烷是混合成因的可能性较小,但是除SN100井所产出样品外,其余样品均落在$\delta^{13}C_1—\delta^{13}C_2$图版的热成因气混合区,从热成熟变化趋势来看,$\delta^{13}C_1$相对于$\delta^{13}C_2$偏重,表明甲烷气体是由不同成熟度气体混合而成,混入的甲烷气体相对乙烷和丙烷成熟度偏高。

基于各烷烃气碳同位素组成回归公式计算出八屋油气田天然气样品热成熟度,列于表4－5。由表中可看出,尽管回归公式有一定的差异,基于甲烷碳同位素算出来的甲烷成熟度(R_o^1、R_o^4、R_o^5)相近,而且与层位具有较明显的相关性浅层的甲烷成熟度较低,深层甲烷成熟度较高,反映了浅层的甲烷可能生成较早,而深层的甲烷则生成较晚。计算R_o的一致性也再次证明了油型气的来源。为便于比较,笔者采用Bernar的回归公式。从表中可看出,浅层甲烷R_o介于1.37%～1.73%之间,深层甲烷R_o则较高,除BK136－1井R_o为1.79以外,其余天然气甲烷成熟度计算R_o均大于2.0%,表征油型裂解气的可能。而由乙、丙烷碳同位素化式计算出来的乙烷、丙烷成熟度则明显较甲烷成熟度低,说明八屋油气田的天然气至少有两期生气过程,早期生成的天然气为原油伴生气,R_o介于1.1%～1.5%之间;晚期生成的天然气则为油型裂解气。由表中还可看出,SN100井甲烷计算成熟度与乙烷和丙烷计算成熟度相差较小,仅

有0.2%左右，暗示最浅层的SN100井混入的高熟的甲烷比例较低。梨树断陷天然气的*B*—*F*关系图（图4－33）上，八屋油气田样品较集中，其*F*值介于1.55～2.36之间，表征了其腐泥型母质来源。

表4－5　八屋油气田天然气样品计算成熟度*数据表

井位	深度（m）	层位	R_o^1（%）	R_o^2（%）	R_o^3（%）	R_o^4（%）	R_o^5（%）
SN100	1146～1150.6	K_1q	1.37	1.14	1.11	1.46	1.55
BD2	1346～1356	K_1d	1.73	1.39	1.25	1.80	1.94
SN98	1516～1520	K_1d	2.28	1.44	1.28	2.32	2.54
BK60－10	2099～2134.5	K_1yc	2.64	1.49	1.35	2.65	2.94
BK61－4	2074.2～2076.6	K_1yc	2.42	1.47	1.30	2.44	2.69
BK136－1	2283～2314	K_1sh	1.79	1.32	1.15	1.87	2.02
BK34	2245.6～2284	K_1sh	2.65	1.38	1.29	2.66	2.95
SW100	2085.3～2088.8	K_1sh	2.68	1.33	1.13	2.69	2.98

* R_o^n 由回归公式（4－*n*）计算出，*n*：1，2，3，4，5。

2. 四五家子油气田

四五家子油气田所产天然气样品的烃类气体的碳同位素呈现明显的正碳同位素系列规律（图4－36）。从图中可看出，四五家子油气田的两个样品的甲、乙、丙烷碳同位素组成呈现明显的正碳同位素系列规律，表征其成因。W180井样品的丙烷和丁烷碳同位素出现了倒转，表征可能有次生作用影响或有不同成因或不同成熟度天然气的混合。从表4－6可看出，四五家子两个样品的烃类化学组成上都是以甲烷为主，但是埋藏较深的W180井干燥系数较低，C_1/C_{1-5}比值为0.93，为湿气，其他气态烃的含量则明显随碳数增加而降低，呈现正常分布，其$iC_4/nC_4<1$，因此可排除生物降解作用的影响。因此，W180井样品的丙、丁烷同位素组成出现的倒转可能是不同成因或不同成熟度天然气的混合或天然气的高成熟度所致。

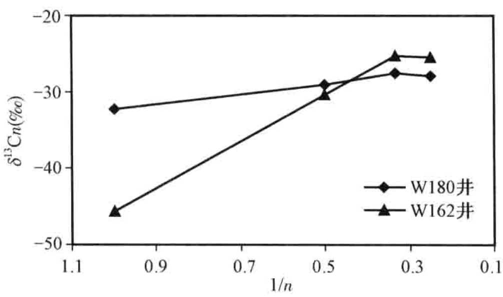


图4－36　四五家子油气田天然气碳同位素组成与碳数倒数的相关性图

表4－6　四五家子油气田天然气化学组成表

井号	深度（m）	层位	化学组成（%）					$C_1/(C_1—C_5)$	iC_4/nC_4
			C_1	C_2	C_3	iC_4	nC_4		
W180	1154～1216.9	K_1q_1	88.75	4.34	1.32	0.27	0.39	0.93	0.68
W162	586～590	K_1q_2	94.45	1.31	0.07	0.05	0.02	0.98	2.22

在对判断天然气成因非常有价值的乙烷同位素组成上，两个样品的$\delta^{13}C_2$分别为－29.0‰和－30.4‰，均低于油型气与煤成气界限值－28.8‰；图4－30中，四五家子油气田的两个样品很明显地落在了Ⅱ区，即油型气区，表征了其母源为腐泥型有机质。

四五家子油气田天然气样品根据甲、乙、丙烷碳同位素组成计算出来的成熟度列于表4－7。从表中可看出，这2个样品的甲烷成熟度相差大。其中W180井天然气中甲烷的计算R_o高达3.8%，而W162井天然气中甲烷的计算R_o仅为0.53%，但其乙烷、丙烷计算R_o值则介于1.2%～1.6%之间。就这两个样品的层位和深度来看，W162井天然气储存于586～590m深的K_1q_2地层，埋深浅，且其干燥系数偏高，C_1/C_{1-5}为0.98，$iC_4/nC_4=2.22>1$，这两个参数受运移影响较大，随运移距离的增加而加大，表征W162井可能是深层较为成熟的天然气样品经历了长距离的运移在K_1q_2地层保存下来后可能又有大量的低熟甲烷的混入，使其形成现在这种化学和碳同位素组成格局。而W180井天然气储存于1154～4516.9m的K_1q_1地层，埋深相对较深，计算出来的热成熟度高，在图4－27中位于原油裂解气区域，表征了该天然气的原油裂解气成因。图4－30中，W162井位于原油伴生气区域，而W180井则位于凝析油伴生气和煤成气区域，正好印证了W162井样品成熟度较低，W180井样品则成熟度较高。

表4－7　四五家子气田天然气计算成熟度* 数据表

井位	深度(m)	层位	R_o^1(%)	R_o^2(%)	R_o^3(%)	R_o^4(%)	R_o^5(%)
W180	1154～1216.9	K_1q^1	3.84	1.38	1.27	3.72	4.23
W162	586～590	K_1q^2	0.53	1.20	1.64	0.61	0.61

* R_o^n 由回归公式(4－n)计算出，n:1,2,3,4,5。

3. *后五家户油气田*

后五家户油气田三个天然气样品，分别来自HD20－18井、HD25－18井和HD26－17井(图4－37)，其中HD20－18井和HD25－18井的气态烃碳同位素呈现正碳同位素系列规律，即$\delta^{13}C_1<\delta^{13}C_2<\delta^{13}C_3$，而且HD25－18井的气态烃碳同位素组成与其碳数的倒数成直线相关，表明该天然气样品中的各气态烃来源单一。但HD26－17井则出现了碳同位素倒转，即$\delta^{13}C_1>\delta^{13}C_2>\delta^{13}C_3<\delta^{13}C_4$，表征了该天然气样品可能来源复杂或经受了次生改造作用。

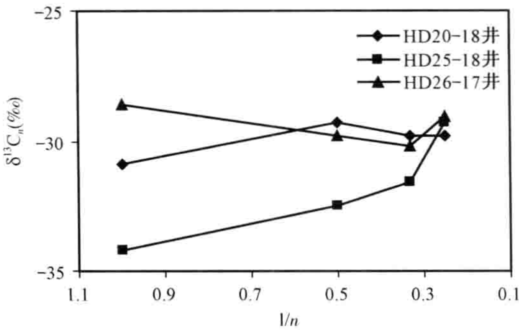


图4－37　后五家户油气田天然气碳同位素组成与碳数倒数的相关性图

从化学组成上来看(表4－8)，后五家户油气田的天然气样品以甲烷气体为主，其含量为95.6%～96.7%；重烃含量很低，干燥系数均为0.98%，其支链烷烃含量并未见明显的升高，iC_4/nC_4比值在0.5左右，从而可排除生物降解作用发生的可能性。

表4－8　后五家户油气田天然气化学组成图

地区	井号	深度(m)	层位	化学组成(%)					$C_1/(C_1—C_5)$	iC_4/nC_4
				C_1	C_2	C_3	iC_4	nC_4		
后五家户	HD20－18	1205～1275	K_1q_1	96.68	1.51	0.15	0.02	0.04	0.98	0.49
	HD25－18	1214～1244	K_1q_1	95.64	1.50	0.16	0.01	0.03	0.98	0.48
	HD26－17	1545～1549	K_1q_1	96.50	1.61	0.15	0.02	0.03	0.98	0.56

从图4－31可看出，无论是 $\delta^{13}C_1$—$\delta^{13}C_2$ 还是 $\delta^{13}C_2$—$\delta^{13}C_3$ 同成因图版，后五家户的3个天然气样品均偏离同成因区，表征了后五家户油气田的天然气可能是不同成因或不同成熟度天然气的混合。图4－29中，后五家户油气田天然气样品主要落在 $\delta^{13}C_1$—$\delta^{13}C_2$ 图版的Ⅱ区，即油型气区，$\delta^{13}C_1$—$\delta^{13}C_3$ 图版的 $Ⅲ^1$ 区，即油型气与煤成气的混合区，表征了后五家户油气田天然气中的单体烃并非同一成因。由于在天然气成因鉴别中 $\delta^{13}C_2$ 的采信程度最高，因此可认为后五家户油气田天然气可能是不同成熟度的腐泥型天然气的混合。

轻烃中的甲基环己烷指数常被用来判识油型气与煤成气，nC_7、$DMCC_5$ 和 MCC_6 三种化合物中，MCC_6 含量 $>50\pm2\%$ 通常被认为是腐殖型气，即煤成气（胡惕麟，1990）。图4－38中，梨树断陷的天然气样品中仅有中央构造带孤家子气田GK33井和东南斜坡带的HS2井的甲基环己烷指数 $>50\pm2\%$，暗示了腐殖型母质的贡献，其他样品均位于腐泥型母质天然气区，其中后五家户天然气样品具有较低的 MCC_6 含量，可基本排除煤成气的混入。再次说明后五家户天然气为不同成熟度油型气的混合。

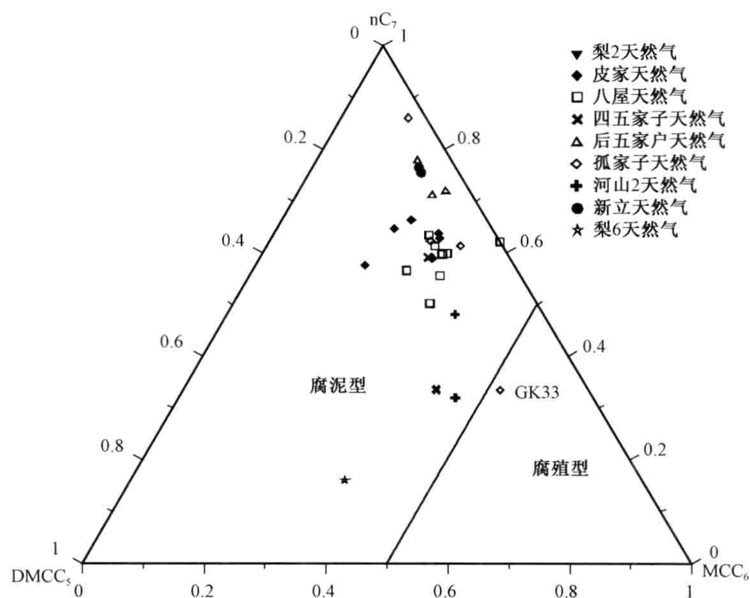


图4－38　梨树断陷天然气的 nC_7—$DMCC_5$—MCC_6 组成三角图

源于腐泥型母质的轻烃组分中富含正构烷烃，源于腐殖型母质的轻烃组分中则富含异构烷烃和芳香烃（Leythaeuser，1979）。同时，富含环烷烃的凝析物是陆源母质的重要特征。基于此不同母质所生成的轻烃相对组成不同的特征，胡惕麟（1990）等研究了四川盆地不同产气层的 C_5、C_6 和 C_7 脂族烃组成，发现腐殖型母质生成的天然气位于三角图图的右下方，而腐泥型母质生成的天然气则位于三角图右上方。图4－39为梨树断陷天然气的 C_6 轻烃脂族烃组成三角图，从图中可看出，除四五家子油气田的W180天然气外，其余样品基本都位于腐泥型气区，后五家户油气田的3个样品的 nC_6 含量更是相对偏高，表征了其腐泥型母质来源。梨树断陷天然气的 C_7 轻烃脂族烃组成则与 C_6 略有差异，除了总体上环烷烃相对含量略有升高外，L6井天然气样品也明显落于腐殖型气区（图4－40）。

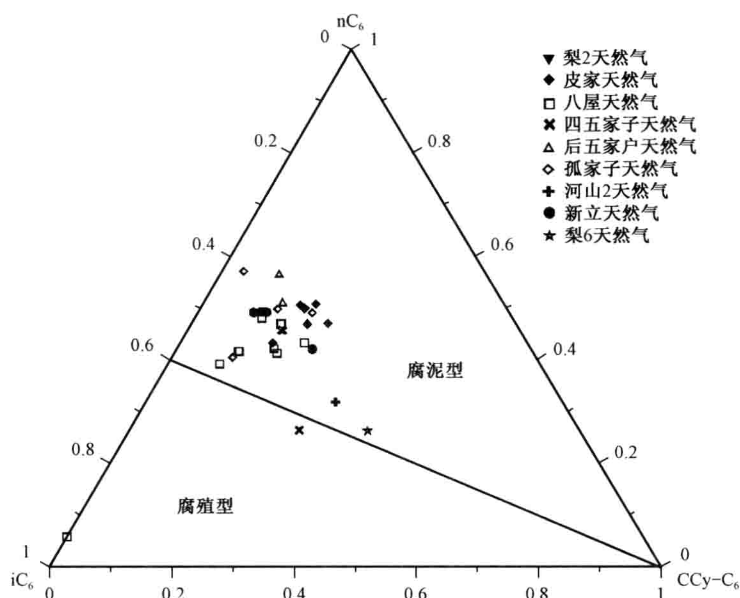


图 4-39　梨树断陷天然气的 C_6 脂族烃组成三角图

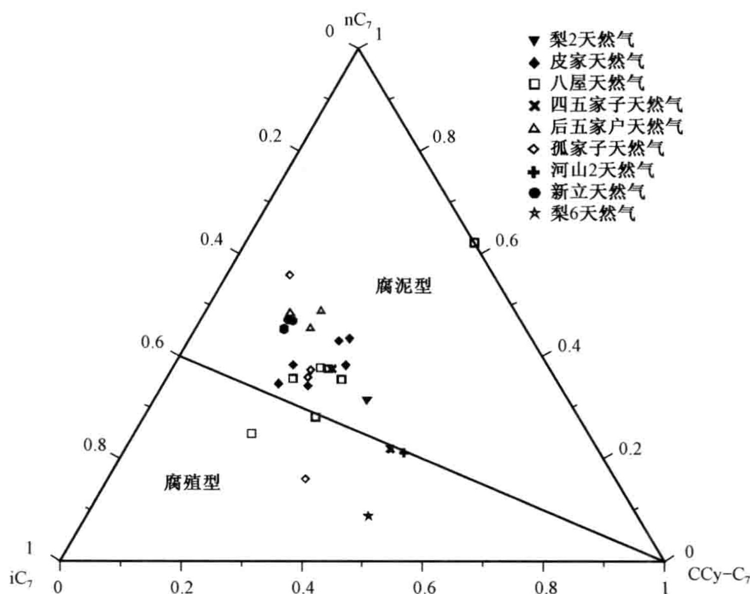


图 4-40　梨树断陷天然气的 C_7 脂族烃组成三角图

张义纲利用甲烷碳同位素值和甲、乙烷碳同位素差值之间的相关性建立了天然气的 X 图版，该图版将天然气划分成 4 个类型：深层混合气或二次生成气、热成气、生物气和浅层混合气或瓦斯气。梨树断陷的 X 图版示于图 4-41，从图中可看出，后五家户油气田的三个天然气样品落于热成气和深层混合气或二次生成气边界处，落点从上至下分别是 HD25-18 井，正碳同位素系列，HD20-18 井，同位素倒转系列以及 HD26-17 井，同位素倒转系列。图版中，有机成因的正碳同位素系列的 HD20-18 井落在深层混合气或二次生成气区域，表明该样品可能是二次生成气，因此，具碳同位素系列的 HD20-18 井和 HD26-17 井的天然气样品应该是有机成因气的混合。

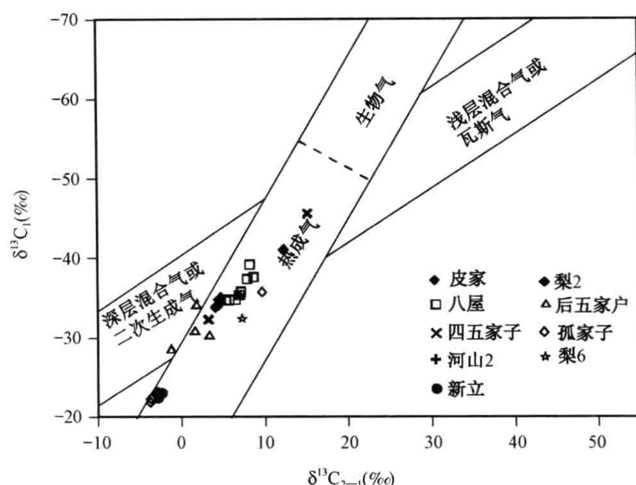


图 4-41　梨树断陷天然气的 X 图版

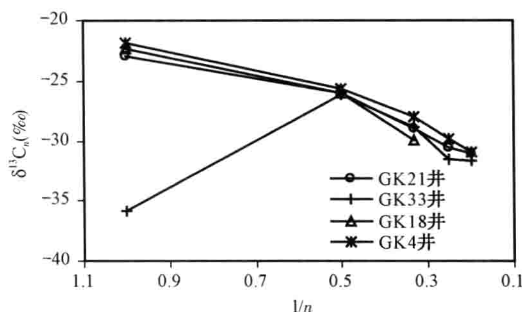


图 4-42　孤家子气田天然气碳同位素组成与碳数倒数的相关性图

4. 孤家子气田

与中央构造带其他油气田的碳同位素组成不同,除 GK33 井具有明显较轻的甲烷碳同位素组成外,余下样品皆呈负碳同位素系列规律。利用天然气的碳同位素组成、碳同位素系列、R/Ra 的比值,以及 $CH_4/^3He$ 浓度比值可以判断天然气是有机成因还是无机成因,据此评价标标准,除 GK33 井外,孤家子气田的其他天然气呈负碳同位素系列规律,即 $\delta^{13}C_1 > \delta^{13}C_2 > \delta^{13}C_3 > \delta^{13}C_4 > \delta^{13}C_5$(图 4-42),且大部分样品 $\delta^{13}C_{1-5}$ 均重于 -30‰,暗示了天然气的无机成因。

但是,出现了以下矛盾:(1)无机成因气的化学组成以 CH_4 占绝对优势,鲜有 C_{2+} 重烃。但是研究区天然气均含有一定程度的重烃(图 4-43、表 4-9),且均能检测出 C_6 以上的轻烃化合物。从与后五家户油田天然气的比较来看,孤家子气田的重烃含量与后五家户相当甚至略高,与天然气无机成因学说相悖;(2)无机成因气往往伴生高含量的 CO_2 气体,但是梨树断陷的天然气样品中几乎检测不到 CO_2 气体(表 4-9),同时检测到的 $\delta^{13}C_{CO_2}$ 并不是很重,基本在 -10‰左右,前文已判识其成因为有机成因,即与烃类共存的微量 CO_2 气体为有机成因;(3)在 $\delta^{13}C_1$—C_1/C_{2+3} 不同成因烷烃气鉴别图版(图 4-30)上,新立气田样品赫然落在 IV 区,即煤成气区,而非无机气区(V^1 和 V^2 区);(4)X 图版上,无论是新立油气田的样品还是孤家子气田的样品均位于热成因天然气区域内(图 4-39);(5)构造研究表明:孤家子区块的断裂主要活动期为登娄库末期及嫩江末期,受张性应力作用形成地堑式断层排列,地堑中心在孤西断块的高部位。由深至浅,断层由少变多,且延伸长。深部 T_4 以下层位,该区断裂不发育。这也就意味着该区的断层可能并未延伸到基底以下,即梨树断陷并无深大断裂带存在。也就是说即使梨树断陷有幔源气生成的话,也缺乏有效的运移通道使之在泉头组和登娄库组储层内聚集成藏,因此,本区天然气中混有无机天然气的可能性并不大。

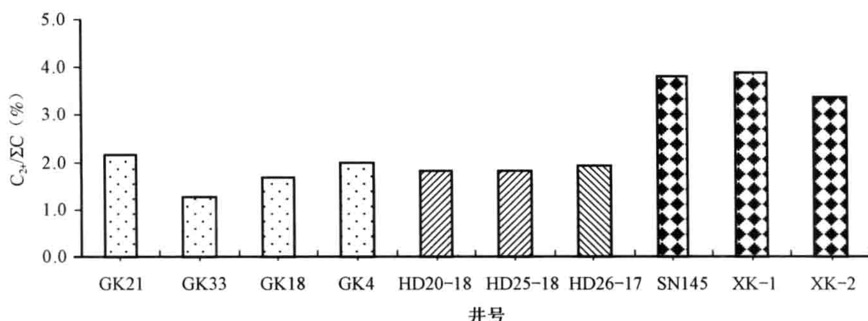


图 4－43 孤家子、后五家户、新立油气田研究区烃类气体中重烃含量图

表 4－9 孤家子气田、新立油气田、后五家户油气田天然气化学组成参数表

井号	深度（m）	层位	化学组成							
			N_2（%）	CO_2（%）	C_1（%）	C_2（%）	C_3（%）	iC_4（%）	nC_4（%）	iC_4/nC_4
GK21	1406.6～1526	K_1q_1	7.32	0	90.68	1.74	0.18	0.01	0.03	0.33
GK33	1352.5～1359	K_1d	4.83	0	93.98	0.96	0.14	0.02	0.04	0.50
GK18	1697.4～1721.8	K_1d	5.54	0	92.9	1.48	0.06	0	0.01	0.00
GK4	1517.4～1524	K_1q_1	7.88	0.04	90.25	1.59	0.15	0.01	0.03	0.33

早在 20 世纪 80 年代，原苏联学者就认为，在碳同位素交换平衡作用下，若地温高于 100℃，则 $\delta^{13}C_3 > \delta^{13}C_2$；地温高于 150℃，$\delta^{13}C_2 > \delta^{13}C_1$；当温度高于 200℃时，则使正碳同位素系列规律改变成为负碳同位素系列规律，即：$\delta^{13}C_1 > \delta^{13}C_2 > \delta^{13}C_3$；因此，烃源岩经历高温，即在高熟—过熟情况下，可能会形成负碳同位素系列规律。

秦胜飞认为塔里木盆地库车坳陷大宛齐的负碳同位素天然气是因散失分馏所致。李君等人认为松辽盆地梨树断陷有两期生烃作用：第一期生烃对现今油气藏没有贡献；第二期以生成高成熟天然气为主。结合前述梨树断陷无机成因的矛盾，可认为由沙河子组、营城组烃源岩在高热演化期生成的有机热成因气对松辽盆地梨树断陷孤家子气田的负碳同位素系列天然气有重要贡献。也就是说，孤家子气田、新立油气田的天然气很有可能是有机成因气的混合。

至于 GK33 井，其重烃含量以及碳同位素组成与孤家子气田其他样品极其相似，同时甲烷含量仍然很高（表 4－9），仅甲烷碳同位素组成轻了许多（图 4－42），可能是由于混源的原因。

（三）东南斜坡带

东南斜坡带共获得 5 个天然气样品，其中新立油气田 3 个样品，东缘的 HS2 井营城组和南缘的 L6 井沙河子组各一个样品。该 5 个样品的单体烃碳同位素组成示于图 4－44，从图中可看出，尽管这 5 个样品均取自东南斜坡，但其碳同位素组成截然不同，其中 HS2 井和 L6 井呈典型的正碳同位素系列规律，表征了其有机成因。图 4－30 上，HS2 井位于Ⅱ区，即油型气区；L6 井则位于Ⅴ区，即生物气和混

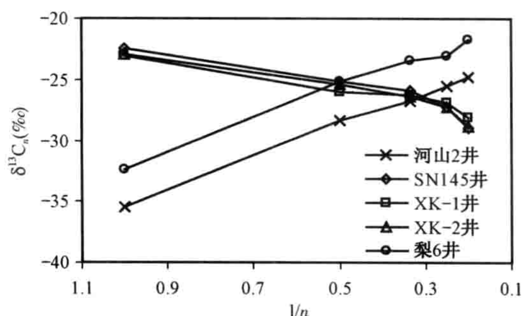


图 4－44 孤家子气田和新立油气田天然气碳同位素组成与碳数倒数的相关性图

合气区。图4－31上，HS2井和L6井均处于Ⅲ^{2}区，即凝析油伴生气和煤成气区，说明了HS2井和L6井均来自腐泥型母质。在同成因鉴别图版（图4－31）上，HS2井和L6井均位于热成因气混合区，说明了这2个天然气样品均为不同热成熟度的混合气。而在图4－32上，HS2井对应R_o范围为1.4%～1.6%，L6井对应R_o范围为1.8%～2.0%，再次表明这2个样品的非均一性。表4－10为HS2井和L6井的天然气计算成熟度，从表中可看出，HS2井和L6井的甲烷成熟度均比乙烷和丙烷成熟度高，但两者也不尽相同，HS2井为油型裂解气与原油伴生气的混合，其乙烷和丙烷成熟度为1.4%左右，但甲烷成熟度达2.4%；而L6井则可能是2种不同成熟度的裂解气的混合，其甲烷成熟度高达3.78%，但乙烷和丙烷成熟度则在2.0%左右。

表4－10　HS2井、L6井天然气计算成熟度*数据表

地区	井位	深度（m）	层位	R_o^1（%）	R_o^2（%）	R_o^3（%）	R_o^4（%）	R_o^5（%）
李家屯	河山2	2083.8～2091.5	K_1yc	2.42	1.47	1.38	2.44	2.69
金山	梨6	2870～2886	K_1sh	3.78	2.06	2.00	3.67	4.17

＊R_o^n由回归公式（4－n）计算出，n：1，2，3，4，5。

至于新立油气田的碳同位素组成，尤其是甲烷和乙烷的碳同位素组成与中央构造带的孤家子气田非常相似，只是高碳数重烃的碳同位素组成则明显较孤家子气田重，暗示了这两个油气田天然气成因主体是相似的，但也存在差异。而且，新立气田天然气的重烃含量明显较后五家户油气田和孤家子气田高（图4－43），CO_2含量为0，即低于仪器检测限。基于对孤家气田天然气成因的分析的同样原理，可认为新立油气田的天然气样品也为有机成因的混合气。

表4－11为后五家户油气田、孤家子气田和新立油气田天然气的单体烃计算R_o，从表中可看出油型气不同计算公式所计算出来的R_o是相接近的，但煤成气则具有较大差异。针对于孤家子气田（GK33井除外）、新立油气田和后五家户油气田特别重的甲烷碳同位素，用油型气的回归公式来计算甲烷的成熟度已经不合适，但计算乙烷和丙烷却是可行的，计算出来的孤家子气田的乙烷成熟度介于1.86%～1.96%之间，丙烷成熟度则介于0.98%～1.21%，乙烷明显重于丙烷，暗示了乙烷也至少由两种不同类型或不同成熟度的单元混合而成。腐殖型天然气的单体烃碳同位素明显较腐泥型的重，因此，可尝试用煤成气的回归方程计算天然气的热演化程度。如果用戴金星院士的煤成乙、丙烷的回归方程计算，孤家子气田的乙烷碳同位素计算R_o介于0.9%～1.03%之间，丙烷则仅在0.15%～0.28%之间，验证了丙烷的非腐殖型母源。至于乙烷的热演化程度虽然似乎有一定的合理性，但需要注意的是，前文所述各种成因判识图版中，梨树断陷区并无明显的腐殖型天然气的组成特点，而且与其丙烷的腐泥型来源相悖，因此，乙烷的计算热演化程度偏高可能得归因于碳同位素较重的乙烷的混入。至于甲烷的超重碳同位素可能是来源于极高成熟度的Ⅲ型干酪根裂解甲烷或者无机成因甲烷与腐泥型甲烷的混合。不同的学者研究所得出的单体烃碳同位素与烃源岩热演化程度的回归方程式并不相同，从表4－11可明显看出，由戴金星的甲烷回归方程式所计算出来的R_o比由Stahl公式计算出来的要高得多，且高出合理范围，可能说明该公式并不适合于研究区或者孤家子气田和新立油气田的天然气中的甲烷有无机甲烷的输入。Patience（2003）认为煤成甲烷的同位素分布范围为－38‰～－22‰，由表4－2可看出，孤家子气田的$\delta^{13}C_1$介于－35.8‰～－21.8‰，后五家户油气田的2个样品介于－30.9‰～－28.6‰，新立油气田则介于－23.1‰～－22.4‰，均位于Patience所定义的煤成甲烷同位素分布范围内，因此，可认为新立油气田和孤家子气田的

甲烷主要是过煤成气的贡献，由于成熟度很高，该煤成气中的乙烷含量相对较低，当于乙烷含量较高的油型气相混合时，就会形成甲烷很重，乙烷相对较轻的特点。由烃源岩研究可知，梨树断陷区下白垩统沙河子组煤层发育，而且沙河子组埋深很深，因而，形成过熟的煤成气是很有可能的。

表 4 – 11　后五家户油气田、孤家子气田和新立油气田天然气的单体烃计算成熟度数据表

井位	深度(m)	层位	Ⅱ有机质(%)					Ⅲ型有机质(%)		
			R_o^1	R_o^2	R_o^3	R_o^{1-4}	R_o^{1-5}	R_o^1 – Stah	R_o^1 – Da	R_o^2 – Da
GK21	1406.6 ~ 1526	K_1q	15.43	1.87	1.09	13.11	16.41	2.28	6.41	0.91
GK33	1352.5 ~ 1359	K_1d	2.28	1.86	1.10	2.32	2.55	0.28	0.80	0.90
GK18	1697.4 ~ 1721.8	K_1d	17.13	1.88	0.98	14.42	18.18	2.55	7.18	0.92
GK4	1517.4 ~ 1524	K_1q	18.35	1.96	1.21	15.34	19.44	2.75	7.74	1.03
HD20 – 18	1205 ~ 1275	K_1q	4.74	1.34	0.99	4.50	5.19	0.62	1.77	0.36
HD25 – 18	/	K_1q	2.89	0.97	0.81	2.88	3.21	0.36	1.03	0.15
HD26 – 17	/	K_1q	6.68	1.28	0.95	6.14	7.26	0.91	2.57	0.32
SN145	1555.7 ~ 1558	K_1q	16.88	2.04	1.52	14.22	17.91	2.51	7.07	1.15
XK – 1	1556.7 ~ 1559	K_1q	15.20	1.88	1.47	12.93	16.18	2.24	6.30	0.92
XK – 2	1587 ~ 1608	K_1q	15.43	2.01	1.44	13.11	16.41	2.28	6.41	1.11

综合以上梨树断陷总体和单个油气田分析，可知梨树断陷的天然气主要为油型气，部分油气田的天然气中可能混入了过熟的煤成甲烷，个别样品中可能有生物甲烷的贡献。同时，各个油气田均有不同程度不同期次生成的天然气的混合，主要可分为以下几种类型：(1)不同成熟度的原油伴生气混合，甲烷成熟度高于重烃成熟度，包括北部斜坡带的皮家气田，中央构造带的八屋油气田、四五家子油气田的 W180 井、后五家户油气田的 HD25 – 18 井和孤家子气田的 GK33 井以及东南斜坡带李家屯地区 HS2 井、金山地区 L6 井。其中 L6 井为两种不同程度油型裂解气的混合；八屋油气田的 SN100 井为不同成熟度的原油伴生气的混合，其甲烷计算成熟度为 1.4% 左右，乙烷和丙烷计算成熟度为 1.1% 左右；其余样品为高—过熟甲烷与原油伴生气的混合；(2)低熟的甲烷气体与高熟的原油伴生气或原油裂解气的混合，包括北部斜坡带苏家屯地区 L2 井，为原油伴生气与原油裂解气的混合；中央构造带四五家子气田 W162 井，其中 W162 井的甲烷成熟度至 0.53%，可能为生物—热催化过渡带气；(3)煤成甲烷与油型气的混合，见于孤家子气田的 GK21 井、GK18 井、GK4 井；后五家户油气田的 HD20 – 18 和 HD26 – 17 井以及东南斜坡带的新立油气田，碳同位素系列规律为负碳或倒转。

第五章 油气源对比与分布

油气源对比可以明确一个含油气盆地中若干个油气藏或油气层中油气的来源，确定主力烃源岩，并可在一定程度上预测油气运移、充注的方向，是油气成藏地球化学研究中非常重要的内容。在梨树断陷烃源岩、原油与天然气地球化学特征研究的基础上，本章运用多种地球化学参数和方法剖析梨树断陷原油与天然气来源，厘定梨树断陷的油气主力烃源岩，并揭示了不同成因类型原油与天然气的分布特征。

第一节 油源对比

一、生物标志物组合特征对比

油源对比的实质是应用有机地球化学基本原理合理选取准确的参数指标来研究原油与烃源岩的相互关系。常用的主要对比方法有分子组成对比和碳同位素组成对比等方法。针对梨树断陷原油地球化学特征，主要利用生物标志物组合特征进行油源对比；另外，油源对比中烃源岩样品需满足较高的有机质丰度和合适的热演化程度等基本要求；同时，油源对比中选取对成因关系解释可靠的生物标志物组成特征，克服成熟度差异、生物降解和水洗等次生作用的影响也是提高对比可信度的关键。

梨树断陷烃源岩与原油最显著的生物标志物组合特征为 C_{29}Ts、C_{30}重排藿烷和 Ts 等化合物组成，因此，重点利用上述生物标志物分布特征综合分析梨树断陷不同油田原油的来源。依照油源对比中烃源岩的基本要求，选取 SN18 井、SN202 井和 SN203 井营城组和沙河子组的烃源岩样品，其 TOC 值大于 0.7%，且镜质组反射率 R_o 值为 0.85 左右，满足作为典型烃源岩样品的要求。图 5－1 和图 5－2 分别展示了不同类型原油与烃源岩中五环三萜类和甾烷分布特征。Ⅰ类原油代表油样与 SN202 井和 SN18 井营城组中部或中下部典型烃源岩均具有 C_{28}和 C_{29}三环萜烷丰度较低、Ts 与 Tm 相当且 C_{29}Ts 和 C_{30}重排藿烷丰度较低的共同特征，同时甾烷分布（m/z 217）也具有较好的对应关系，而与图 5－2 中典型 SN203 井沙河子组烃源岩的五环三萜类和甾烷分布具有明显差异。Ⅱ类原油代表样品和 SN203 井沙河子组烃源岩刚好与上述特征相反，具有高含量 C_{28}和 C_{29}三环萜烷、Ts、C_{29}Ts 和 C_{30}重排藿烷等分子化合物。因此，秦家屯、四五家子等油田Ⅰ类原油与以 SN203 井为代表的沙河子组上部烃源岩存在显著差异，而与以 SN202 井和 SN18 井为代表的营城组中下部烃源岩分子组合特征相同；八屋油田 BK60 区块、SN54 区块、皮家、李家屯和七棵树部分地区（SW9 井与 SW11 井）Ⅱ类原油主要来源于 SN203 井沙河子组源岩或与之相对应的一套岩层（表 5－1）。混源油是Ⅰ类和Ⅱ类原油的混合，推测其可能由上述两套烃源岩混合供烃。

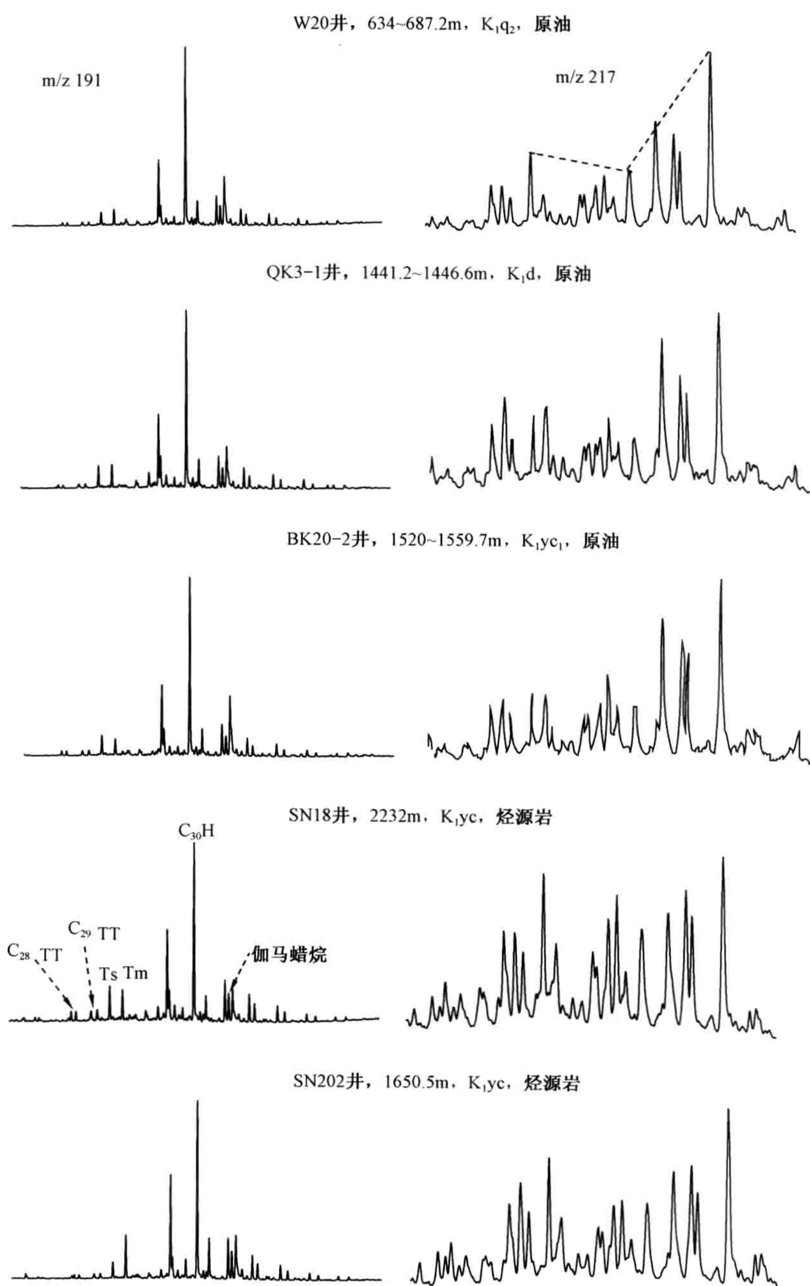


图5-1　梨树断陷Ⅰ类原油与营城组烃源岩部分甾萜烷（m/z 191 和 m/z 217）组成对比图

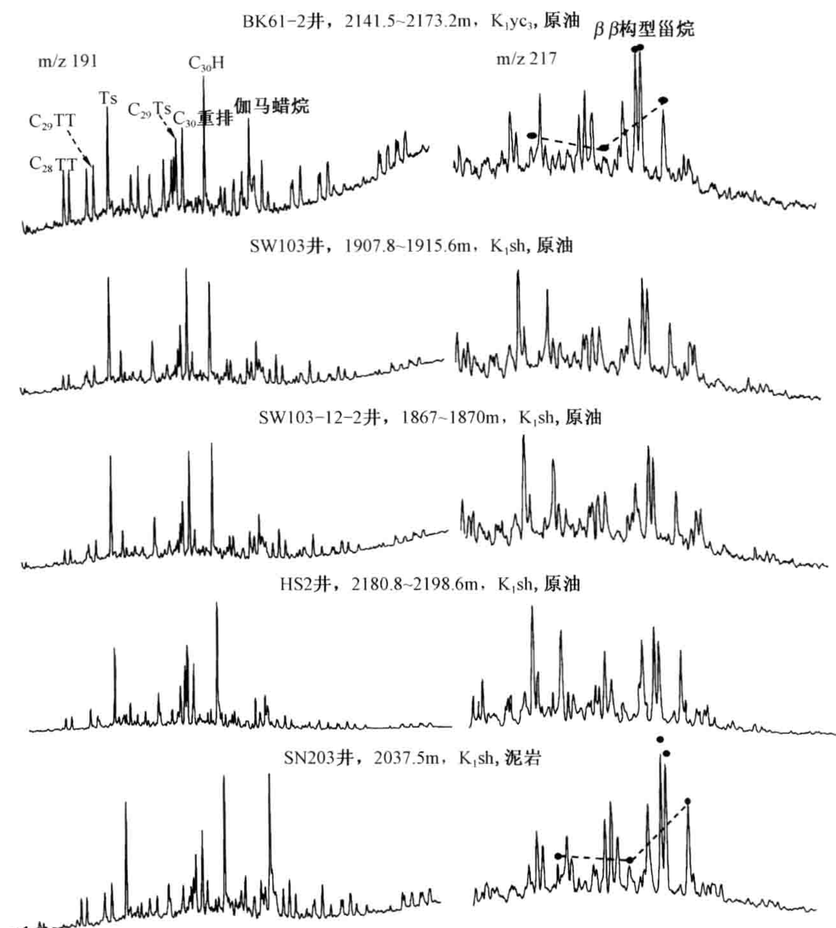


图5－2 梨树断陷Ⅱ类原油与沙河子组烃源岩部分甾萜烷（m/z 191和m/z 217）组成对比

表5－1 梨树断陷原油分布特征与主力烃源岩对比表

原油类型	原油分布	原油主要特征	供烃源岩分布
Ⅰ	秦家屯、四五家子泉头组与登娄库组原油为主	伽马蜡烷含量中等，低的C_{28}和C_{29}三环萜烷、Ts≤Tm、C_{29}降藿烷＞C_{29}Ts＞C_{30}重排藿烷、C_{27}R甾烷＞C_{28}R甾烷＜C_{29}R甾烷、ββ构型甾烷含量低	营城组中下部或与之相对应的一套烃源岩
Ⅱ	八屋BK60区块、SN54区块、皮家地区营城组与沙河子组原油为主	伽马蜡烷含量高，高的C_{28}和C_{29}三环萜烷、Ts＞＞Tm、C_{29}降藿烷＜C_{29}Ts＜C_{30}重排藿烷、C_{27}R甾烷≤C_{28}R甾烷＜＜C_{29}R甾烷、ββ构型甾烷含量高	沙河子组上部或与之相对应的一套烃源岩
混源	登娄库组至沙河子组原油均有	介于二者之间	上述两套烃源岩混合供烃

根据甾萜化合物的分布特征，选取Ts/Tm、C_{29}Ts/C_{29}藿烷和C_{30}重排/C_{30}藿烷参数值绘制了不同类型原油与烃源岩的对比图（图5－3）。Ⅰ类原油与营城组烃源岩均具有较低的Ts/Tm、C_{29}Ts/C_{29}藿烷和C_{30}重排/C_{30}藿烷比值，与SN92井和SN203井沙河子组烃源岩样品差异

明显；而Ⅱ类原油与SN92井和SN203井沙河子组烃源岩的上述对比参数均明显具有较高值，表现出非常一致的参数分布特征。

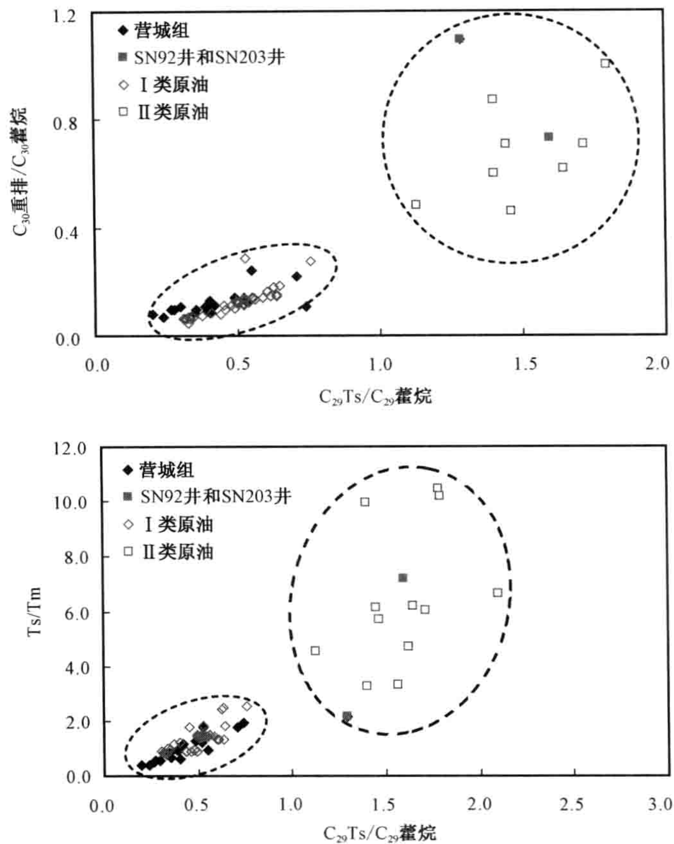


图5－3　梨树断陷油源对比地球化学参数图版

由以上的生物标志物组合特征与参数对比可得出表5－1油源对比结论：梨树断陷营城组中下部，或与之相对应的一套烃源岩为Ⅰ类原油的主力烃源岩；沙河子组上部或与之相对应的一套烃源岩为Ⅱ类原油的主力烃源岩；混源油显然具有上述两套主力烃源岩混合供烃的特征。

二、油源条件分析

沙河子组沉积中晚期是梨树断陷发育的鼎盛期，半深湖—深湖相沉积范围广，代表了盆地断陷层最大水进期，沿东、南与北三个方向扩展为滨浅湖相沉积。全盆除北部斜坡SN75井—SW3井—SN48井一线北部缺乏沙河子组烃源岩分布外，其他地区均存在烃源岩分布，其中苏家屯次洼、八屋、金山和秦家屯地区都有好烃源岩的分布，TOC高值可达5.55%。有机质类型主要为$Ⅱ_2$—Ⅲ型，洼陷带类型可能偏好，为$Ⅱ_2$—$Ⅱ_1$和Ⅰ型，断陷边缘斜坡带主要为Ⅲ型。热演化程度上，断陷斜坡带的八屋和秦家屯等地区沙河子组烃源岩主要处于成熟阶段，皮家—后五家户—DB32井以西的烃源岩已达高成熟阶段。较高的热演化程度与八屋和皮家等地区营城组和沙河子组原油黄色和棕黄色物性特征一致。综合来看，洼陷带和斜坡带沙河子组烃源岩均可生成大量原油，且以生成较高成熟度的原油为主，原油运聚成藏在洼陷带周缘和斜坡带地区深部的营城组和沙河子组油藏中。

营城组沉积早—中期，伴随着桑树台控盆断裂不断构造沉降，沉积范围继续扩大，箕状断陷此时达到一定规模。特别是在营四段和营五段沉积时期，梨树断陷仍处于较高水位，半深湖—深湖相沉积广泛分布，向东南和北部斜坡带水体逐渐变浅，持续发育滨浅湖相沉积。上述沉积特征造成营城组烃源岩较高有机质丰度的层段主要集中于下部，尤其是中央构造带和苏家屯次洼等地区，其中后五家户的 LS1 井和八屋 SN65 井这种特征表现得尤为突出，TOC 值可分别达 1.61% 和 3.38%。岩石热解分析揭示了营城组在八屋地区部分样品有机质类型达到Ⅱ型，且有机质显微组成也展示了同样的特征。目前，八屋地区为梨树断陷勘探程度较高的地区之一，在大量样品分析的基础之上，上述特征暗示了营城组部分层段有机质类型在八屋地区可能为Ⅱ型，向洼陷带推进，甚至可能出现Ⅰ型有机质。热演化程度上，营城组烃源岩在皮家和八屋地区及断陷西南地区均已进入成熟阶段，四五家子地区及其西南地区已达高成熟阶段。由此来看，营城组中下部具有较好的生烃物质基础，较好的有机质类型和较高的热演化程度，必然生成大量原油，尤其洼陷区及其周缘的后五家户与四五家子地区，以及缓坡带分布的营城组中下部烃源岩必然为秦家屯和四五家子地区的泉头组和登娄库组原油提供了良好的油源。

第二节　气源对比

天然气组分单一，可供选择的指标较少，并且这些指标受热演化、运移效应、生物降解作用等影响较大，因此气源对比相对于油源对比难度要大。

目前常用的气源对比方法主要有两种：一种主要是通过伴生凝析油（或原油）作为中间桥梁，利用生物标志物等分布特征建立原油与烃源岩关系，再通过油源关系得到气源关系，这种方法间接，只能确定液态烃与烃源岩之间的关系，并不能直接确定天然气与烃源岩之间的关系。另一种常用的气源对比方法是通过气—气对比来确定烃源岩，也就是说，在大量天然气分析资料的基础上，总结出不同类型天然气地球化学特征的判识指标，然后根据该地区的天然气性质确定天然气成因类型，最后根据烃源岩的发育特点和有机质类型来解决气源问题，该方法只能用于大套烃源岩的对比，如在同一地区存在几套性质、热演化程度相近的烃源岩层，该方法适用程度低。随着天然气分析测试技术的进步，一些新的气源对比方法被提出，如 K－Ar 关系（郑建京，2005）、苯和甲苯的同位素（蒋助生，2000）等；Hakan Hoşgörmez（2005）对天然气进行模拟，然后再与各烃源岩进行匹配，以判断主力气源岩；Boreham（2008）利用新戊烷的碳、氢同位素进行已降解的天然气—烃源岩对比，这些对比方法都是推论法，并没有实现直接对比。本研究将从气—烃源岩轻烃直接对比和天然气来源分析两方面入手，较为准确地厘定梨树断陷的主力气源岩。

一、气—岩轻烃组成对比

烃源岩生成各种烃类化合物后，气态烃由于其分子半径小、相对密度低，极易挥发，因此很难在烃源岩中检测到。但是轻烃类化合物由于其分子半径稍大，因此会在烃源岩中有一定残留。对于天然气而言，稍高分子量的烃类可溶解在气态烃中，因此，对天然气中的轻烃进行浓缩，则可对其进行一系列分析。也就是说，烃源岩吸附气和气藏气中均会有轻烃化合物存在，因此也就为气源直接对比提供了一种媒介和可能性。

为实现直接气源对比，特选取了 9 个 TOC 值高且镜质组反射率相对较高的样品（表 5－2），进行了岩石热解—冷阱—轻烃气相色谱分析以代表烃源岩吸附气的轻烃组成。遗憾

的是，由于岩样本身原因，9 个样品中仅河山 2 井营城组 1850.5m 与沙河子组 2350m、SN52 井营城组 2871.3m、沙河子组 3207.9m 以及 SN203 井营城组 2037.5m5 个样品得到了较为完整的轻烃系列（图 5－4）。

表 5－2　测定烃源岩吸附气轻烃气相色谱的样品基本信息表

井号	深度（m）	层位	岩性	TOC（%）	R_o（%）
河山 2	1850.5	K_1yc	深灰色泥岩	0.57	0.955
河山 2	2350	K_1sh	灰黑色泥岩	0.81	1.239
SN92	2081.43	K_1yc	泥岩	2.13	0.815
SN52	2871.30	K_1yc	灰黑色泥岩	0.76	1.271
SN203	2037.5	K_1sh	泥岩	2.82	0.834
SW3	2632	K_1yc	泥岩	1.78	1.335
SN52	3207.90	K_1sh	灰黑色泥岩	1.04	1.439
SN17	2258.8	K_1sh	泥岩	3.09	0.835
SN152	2276.76	K_1sh	泥岩	2.01	0.825

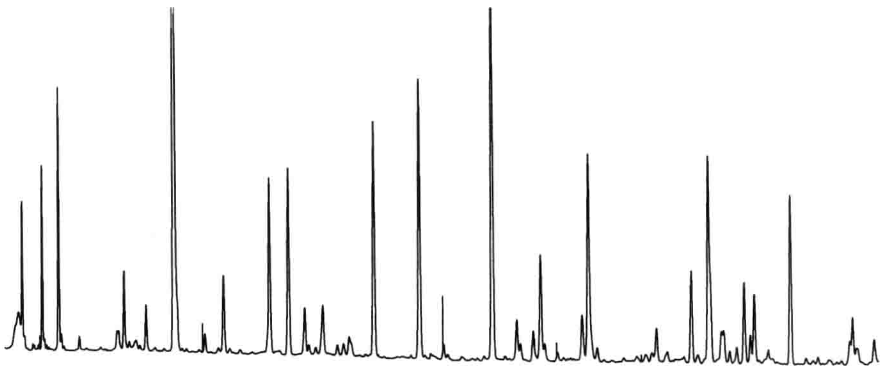


图 5－4　梨树断陷 SN52 井 2871.3m 烃源岩吸附气轻烃气相色谱图

原油和天然气的族组成往往与其生烃母质、热演化程度等有关，在轻烃化合物中链烷烃（含正构烷烃和支链烷烃）、环烷烃和芳香烃的相对组成也可以表征轻烃的母质类型和来源，图 5－5 和图 5－6 为梨树断陷原油、天然气和烃源岩吸附气的 C_6 和 C_7 轻烃化合物的族组成，从图中可看出，无论是 C_6 还是 C_7 化合物，原油、天然气和烃源岩吸附气均相对贫芳烃、富链烷烃，与其腐泥型母质来源相吻合，而且天然气样品明显较原油样品富含链烷烃而贫环烷烃，可能与其热演化程度有关。值得注意的是，SN52 井营城组和沙河子组烃源岩吸附气的 C_6 族组成和 C_7 族组成有较大差异，可能与 SN52 井附近沙河子组有岩浆侵入、烘烤有关，因此，其成烃模式可能与其他样品存在较大差异。C_6 轻烃族组成中，SN52 井营城组、SN52 井沙河子组和河山 2 井营城组烃源岩吸附气与天然气相似，尤其是 SN52 井沙河子组吸附气具有最高的链烷烃组成，一方面说明营城组和沙河子组烃源岩可能均对梨树断陷的天然气有贡献，另一方面则可能说明了侵入岩浆对烃源岩的作用对本区天然气的形成可能有较大影响。而 C_7 轻烃族组成中，SN52 井吸附气具有所有样品中最高的芳香烃含量，可能与其高温烘烤作用有关。河山 2 井营城组的 C_7 族组成与天然气样品相似，再次说明了营城组烃源岩的贡献。

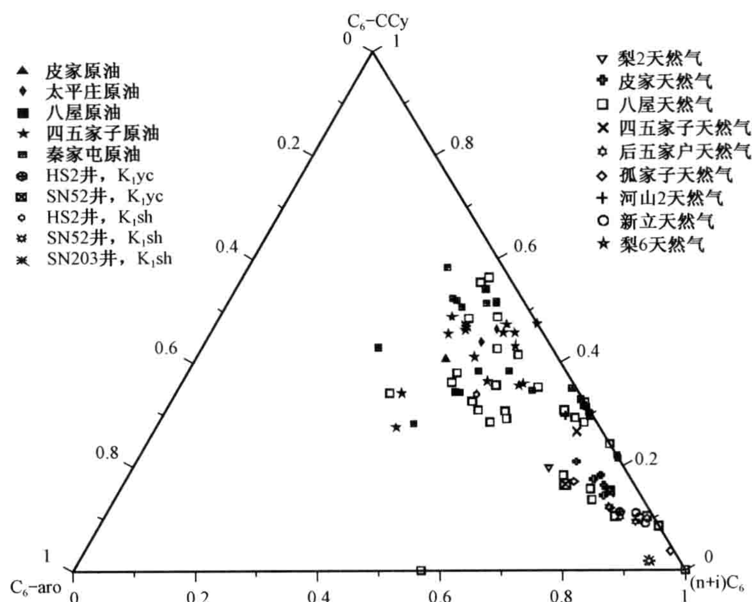


图 5-5　原油、天然气和烃源岩吸附气 C_6 轻烃族组成图

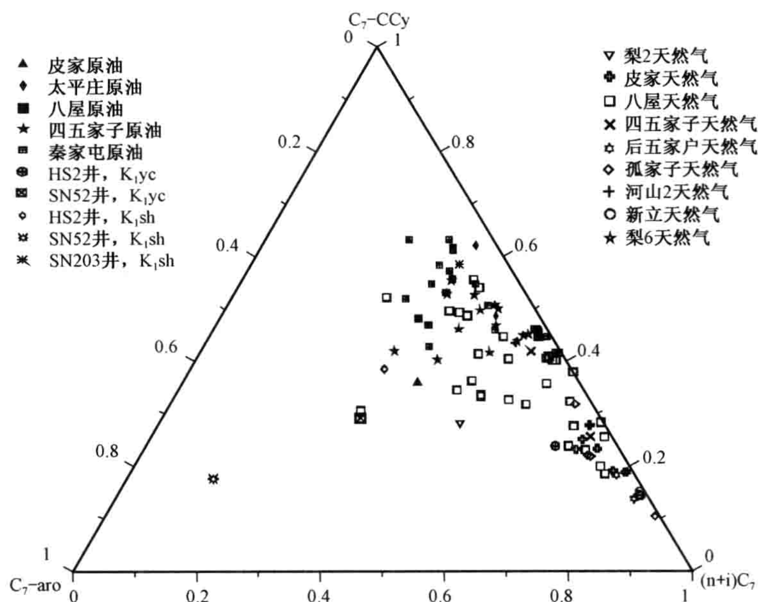


图 5-6　原油、天然气和烃源岩吸附气 C_7 轻烃族组成图

一般认为芳香烃和环烷烃来源于陆源物质，而支链烷烃则来源于水生生物，不同的陆源生物中芳香烃和环烷烃含量不一，而且与成熟度有关。因此，可利用芳香烃、环烷烃和支链烷烃以及正构烷烃的相对含量进行油气源对比。图 5-7 中原油样品有较高的$(2-MC_6+3-MC_6)/nC_6$ 比值、MCC_6/CC_6 比值和$(BZ+CC_6)/nC_6$ 比值，而天然气样品上述三比值均较低，说明原油相对天然气来说，富高分子化合物和环烷烃、芳香烃，烃源岩吸附气则与天然气相似，除 SN203 井沙河子组烃源岩吸附气外，余者皆落在天然气区，同时也表征了营城组和沙河子组烃源岩对天然气的贡献。

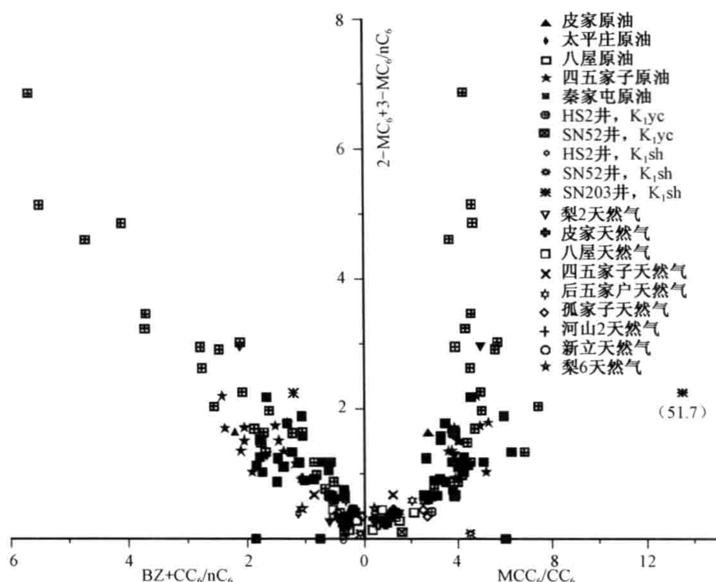


图 5－7　原油、天然气和烃源岩吸附烃中 BZ、CC_6、MCC_6、$2MC_6$、$3MC_6$ 和 nC_6 的相对组成图

正庚烷（nC_7）、甲基环己烷（MCC_6）和二甲基环戊烷（$DMCC_5$）的相对含量经常被用来判断原油或天然气的母质类型，腐殖型的往往具有高 MCC_6，腐泥型则相反。图 5－8 中，梨树断陷的原油明显较天然气具有较高的 MCC_6 含量，可能表征了母类类型的差异，或者与 MCC_6 在气相和液相中分配系数的差异有关。由图 5－8 中可看出，李家屯河山 2 井营城组烃源岩样品的 nC_7、MCC_6 和 $DMCC_5$ 相对组成与后五家户样品相似，落点在一起，暗示了营城组烃源岩对后五家户油气田天然气的贡献。值得注意的是，3 个沙河子组烃源岩的吸附气轻烃组成都相对富含 MCC_6，与梨 6 井、河山 2 井和四五家子油气田的 W162 井相似，可能说明这几个样品中存在沙河子组烃源岩的贡献。

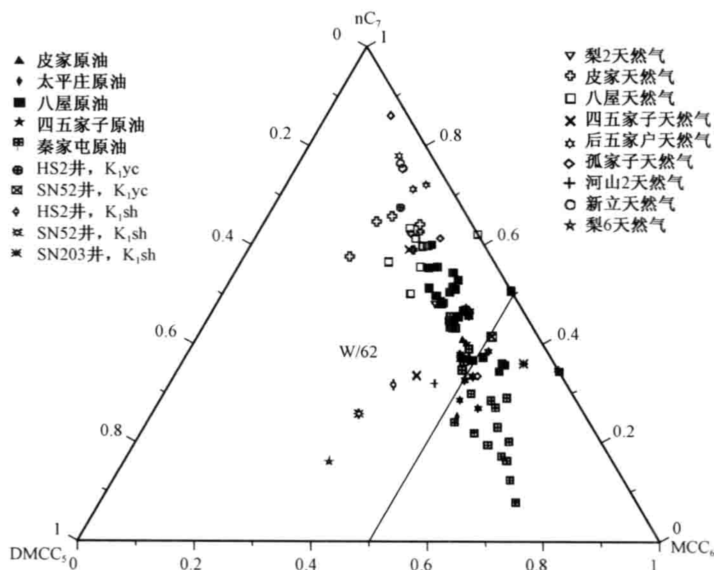


图 5－8　梨树断陷原油、天然气、烃源岩吸附轻烃的 MCC_6 指数图

图5－9为梨树断陷烃源岩热裂解轻烃和原油、天然气轻烃的$DMCC_5$、Tol＋MCC_6和$2MC_6$＋$3MC_6$相对组成三角图，从图中可看出，梨树断陷的原油明显较天然气富含芳香烃和甲基环己烷，表征其陆源有机质输入可能较多，而天然气相对富含链烷烃，可能表明水生生源输入较多。得到轻烃样品的5个烃源岩样品除河山2井营城组介于两者之间外，余者皆具有较高的芳香烃和环烷烃含量。

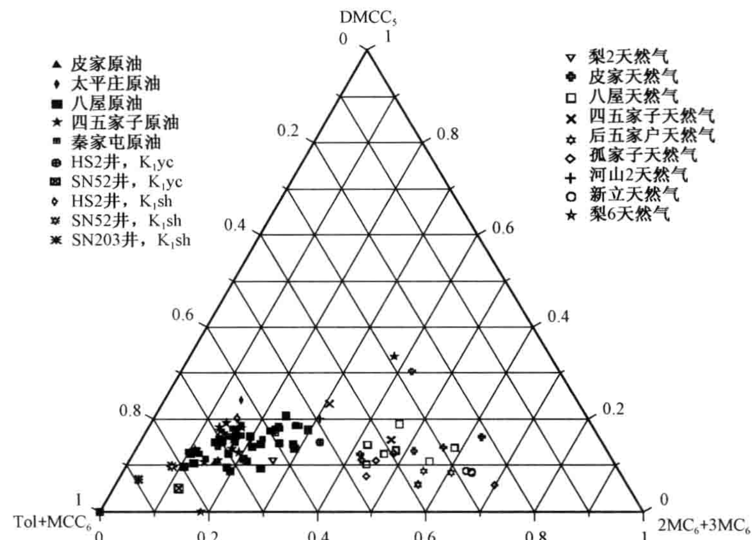


图5－9　原油、天然气、烃源岩吸附轻烃的$DMCC_5$、Tol＋MCC_6和$2MC_6$＋$3MC_6$相对组成图

轻烃中C_7化合物相对组成可用来辅助判断沉积环境的还原性和含盐度，王培荣（2008）利用N/I（CC_7/iC_7）、A/P（TOL/nC_7）和I/P（iC_7/nC_7）成功地对不同油样进行了含盐度的分类，梨树断陷仅河山2井营城组烃源岩吸附气与天然气的相对组成相似（图5－10），说明了其沉积水体的相似性。

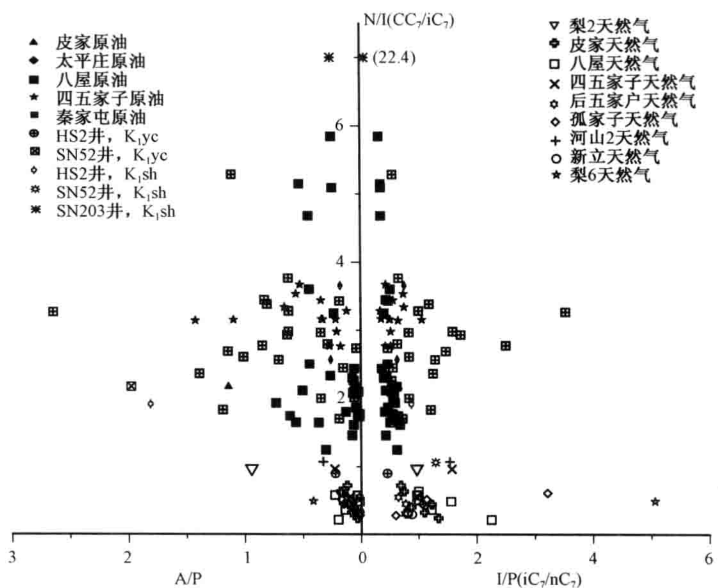


图5－10　原油、天然气和烃源岩吸附轻烃的I/P－N/I和A/P－N/I的相关性图

值得注意的是，以上这些轻烃指标均与成熟度有着密不可分的关系，原油与天然气之间的差异一方面可能是母质来源的不同造成的，另一方面可能与其热演化程度相关。

二、天然气来源分析

由第四章可知，梨树断陷的天然气组成相当复杂，根据其化学组成、碳同位素组成和轻烃组成综合判识天然气为混源天然气，其端元气包括生物热催化过渡带气（$R_o < 0.5\%$）、油型气和煤成气三大类，主体为油型气。按照天然气的成因分类（戴金星，1992），油型气即腐泥型天然气的简称，由Ⅰ、$Ⅱ_1$型干酪根降解而成；煤成气为腐殖型天然气的简称，由$Ⅱ_2$、Ⅲ型干酪根降解而成。

目前并未找到适合梨树断陷煤成气成熟度的计算公式，而且孤家子气田 GK21 井、GK18 井和 GK4 井以及新立油气田 SN45 井、XK1 井、XK2 井 6 个天然气样品的 $\delta^{13}C_1$ 组成非常接近，介于 −23.0‰～−21.8‰之间，正好位于 Patience 所定义的煤成气的碳同位素组成范围 −38‰～−22‰的上限值附近，说明该煤成气的热演化程度很高。在烃源岩有机质类型研究中可知，梨树断陷沙河子组母质类型多为Ⅱ—Ⅲ型，图 5－11 中可看出，位于靠近断陷中央位置的 SN80 井的营城组中部的烃源岩镜质组反射率已达 2.3%，因此，下伏的沙河子组烃源岩的 R_o 更高，很有可能是孤家子和新立气田煤成气的气源岩。至于后五家户的 HD20－18 和 HD26－17 井天然气的 $\delta^{13}C_1$ 稍轻，范围为 −28.6‰～−30.9‰，表明其煤成气的成熟度稍低，可能来源于埋深较浅的沙河子组。至于油型气来源的重烃，孤家子气田的 $\delta^{13}C_3$ 值范围为 −29.9‰～−27.9‰，计算 R_o 范围为 0.98%～1.21%；后五家户油气田的 $\delta^{13}C_3$ 介于 −31.6‰～−29.8‰之间，计算 R_o 为 0.81%～0.99%；结合成藏期可知，后五家户油气田的泉头组成藏期为泉头期，此时的营城组烃源岩正好处于成熟期。平面上孤家子气田更靠近洼陷中心，即其沉积的地层稍厚，热演化程度稍高，因此，孤家子气田和后五家户油气田天然气中的重烃可能来源于营城组烃源岩。

新立油气田的天然气样品均采自泉头组，其 $\delta^{13}C_3$ 介于 −26.4‰～−25.9‰之间，计算 R_o 值范围为 1.44%～1.52%，其成熟度较后五家户油气田的重烃稍高。同时，新立油气田位于东南斜坡带，其埋深相对较浅，因此，重烃可能来源于埋藏较深的沙河子组。

结合孤家子、后五家户、新立气田天然气均为干气，且其 $\delta^{13}C_1$ 接近煤成气的上限值，可知煤成气为气藏的主要端元气。

综上所述，孤家子气田和后五家户油气田的天然气以沙河子组腐殖型母质所形成的煤成气为主，但其重烃则主要来自于营城组，而新立油气田天然气的重烃则主要来自沙河子组。

梨树断陷的其他天然气样品均为不同成熟度的油型气之间的混合。北部斜坡带的梨 2 井天然气样品取自营城组，其 $\delta^{13}C_1$ 值为 −41.1‰，相应 R_o 为 1.03%，而 $\delta^{13}C_2$ 和 $\delta^{13}C_3$ 稍重，相应 R_o 为 1.4% 左右，表明重烃成熟度稍高，由于甲烷的成熟度和重烃的成熟度差异较小，且均位于生油高峰期，根据同处北部斜坡带的 SN92 井营城组烃源岩所测得的 R_o 值为 0.82%，可判断其天然气来源于下伏的沙河子组。与梨 2 井距离较近的皮家气田与梨 2 井截然不同，皮家气田的天然气样品均采自营城组，但其甲烷碳同位素偏重，而乙烷和丙烷碳同位素则偏轻，计算的 $R_o(C_1)$ 介于 2.53%～3.07% 之间，显然来自于凹陷中心的沙河子组，而 $R_o(C_2)$ 和 $R_o(C_3)$ 则均为 1.2% 左右，表明乙烷和甲烷为同成因，可能来自于斜坡带的沙河子组。

中央构造带八屋油气田中 SN100 井的天然气样品具有相似的甲烷、乙烷和丙烷成熟度，其 $R_o(C_1)$ 稍高，为 1.37%，$R_o(C_2)$ 和 $R_o(C_3)$ 分别为 1.11% 和 1.14%，表明该天然气样品可能为同成因。由与其邻近的 SN64 井的埋深曲线可看出（图 2－43），中央构造带中部偏东部的烃

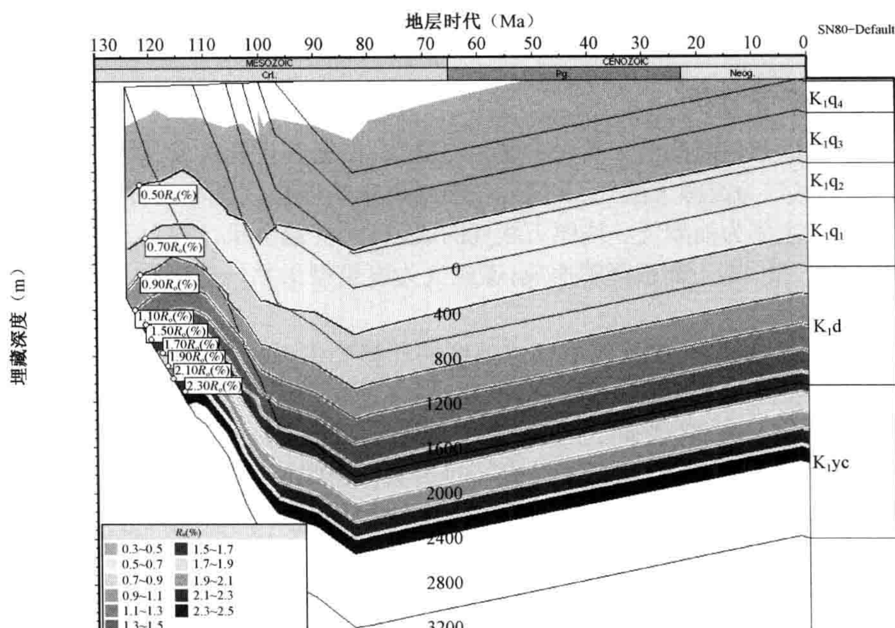


图 5－11　SN80 井地层埋深史与热演化史曲线图

源岩热演化程度并不高，沙河子组仅为 0.9% ~1.1%，显然低于 $R_o(C_1)$，因此，SN100 井的天然气可能源于埋深较大的且较 SN64 井更靠近断陷中心的沙河子组烃源岩。八屋油气田的其他 7 个天然气样品的 $R_o(C_3)$ 范围为 1.15% ~1.35%，$R_o(C_2)$ 范围为 1.32% ~1.49%，$R_o(C_1)$ 则变化较大，BK136－1 井和 BD2 井的天然气样品该值分别为为 1.73% 和 1.79%，余者 $R_o(C_1)$ 值介于 2.28% ~2.68% 之间，表明八屋地区可能至少有两次生气、排聚气过程，其中成熟度较低的可能来自于八屋地区附近的沙河子组烃源岩，而高成熟的天然气则可能来自断陷中心的沙河子组烃源岩。

四五家子油气田 W180 井的天然气样品取自于埋深 1154 ~1216.9m 的 K_1q_1 地层，其甲烷碳同位素明显偏重，$R_o(C_1)$ 高达 3.84%，可能反映了凹陷中心的沙河子组烃源岩的贡献，其 $R_o(C_2)$ 和 $R_o(C_3)$ 较相近，分别为 1.38% 和 1.27%，表征乙烷和丙烷可能为同成因，也就是说，该天然气样品为成熟度 1.3% 左右的油型气（来自附近的沙河子组烃源岩）和成熟度高于 3.8% 的裂解甲烷的混合（来自凹陷深处的沙河子组烃源岩）。

后五家户油气田 HD25－18 井的 K_1q_1 天然气 $R_o(C_3)$ 较低，仅为 0.81%，$R_o(C_2)$ 也仅为 0.97%，但 $R_o(C_1)$ 较高，为 2.89%，表明其重烃可能来自热演化程度稍低的营城组，与该油气田其他 2 个样品相吻合，而甲烷则主要来自凹陷中心的沙河子组。

孤家子气田的 GK33 井的 $R_o(C_1)$、$R_o(C_2)$ 和 $R_o(C_3)$ 分别为 2.28%、1.86% 和 1.10%，也反映了一种原油裂解气与原油伴生气的混合，其气源可能与八屋油气田相似。

综上所述可知，中央构造带上后五家户油气田的气源与其他油气田不同，既有营城组也有沙河子组的贡献，而其他样品则均来自沙河子组，只不过是凹陷中心和非凹陷中心均有贡献。

第四章中对东南斜坡带金山梨 6 井和李家屯河山 2 井的天然气成因已有详细探讨，其中河山 2 井为过成熟的裂解甲烷与成熟的原油伴生气的混合，原油伴生气的成熟度为 1.3% 左右，而该井营城组烃源岩所测得的 R_o 值为 0.92%，沙河子组为 1.24%，因此，该天然气可能直接来自周围的沙河子组烃源岩，而过成熟的裂解甲烷则可能来自断陷深部的沙河子组。梨 6

井天然气则为两种不同成熟度的油型裂解气的混合，可能均来自沙河子组。

根据天然气的化学组成、碳同位素组成和轻烃组成对天然气进行的成因分析，以及基于轻烃组成的气源直接对比和气源分析可知，梨树断陷的天然气主要是各种类型的混合气，第一类为高—过成熟的煤成气与油型气的混合，主要见于孤家子气田、后五家户气田和新立气田，其碳同位素组成呈现异常的负碳同位素系列规律，甲烷碳同位素组成在煤成气的上限附近，但乙烷和丙烷则为成熟—高成熟的油型气，后五家户的天然气成熟度相对略低，断陷中心埋深较大的沙河子组煤层为其主力烃源层；第二类则为不同成熟度的油型气的混合，主要见于北部斜坡、中央构造带的八屋油气田和四五家子油气田及后五家户油气田部分样品以及东南斜坡带的南缘梨6井和中间部位的河山2井，其中梨6井为不同成熟度的油裂解气的混合，这部分天然气的主力烃源层为热演化程度合适的营城组和沙河子组。

第三节　油气分布特征

一、原油分布特征

由前文分析可知，Ⅰ类和Ⅱ类原油主要分布在梨树断陷的浅部与深部层位，因此，本研究主要从不同层位来探讨不同类型原油分布。

如图5－12所示，梨树断陷登娄库组和泉头组不同类型原油主要呈现明显不同的分布规律。Ⅰ类原油主要分布于八屋、四五家子、七棵树和秦家屯地区，而混源油则主要分布于后五家户等更为靠近深凹带的区域，在秦家屯的西南段，两类原油交错分布。

图5－13中，梨树断陷营城组主要分布Ⅱ类原油与混源油。混源油主要分布于苏家屯次洼和八屋、四五家子、七棵树、太平庄和秦家屯等地区，Ⅱ类原油则主要分布在混源油之间，皮家、北部斜坡、八屋BK60井和SN54井区，以及后五家户地区。整体来看，营城组主要分布混源油。

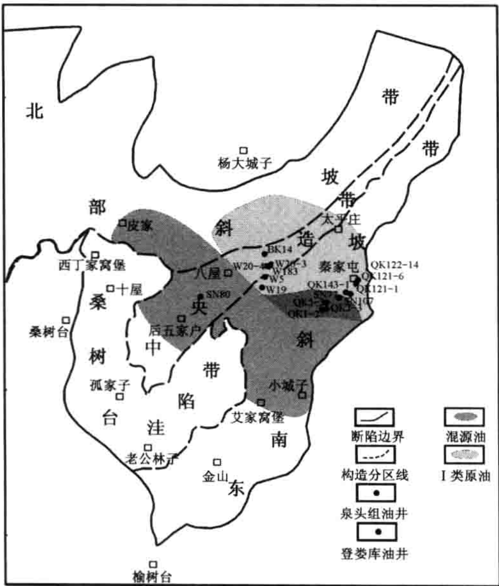


图5－12　梨树断陷登娄库组和泉头组油藏不同类型原油分布图

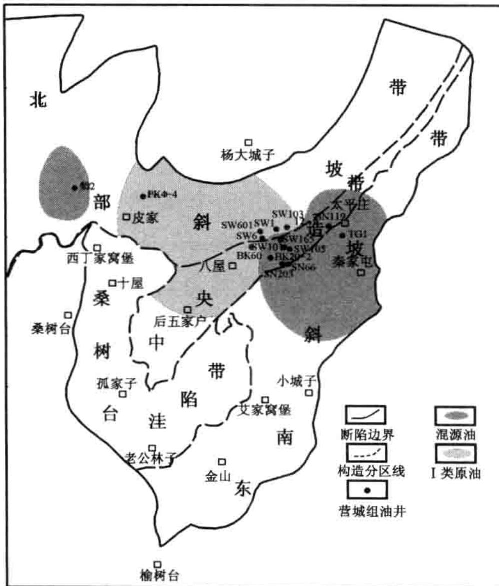


图5－13　梨树断陷营城组油藏不同类型原油分布图

由图 5 - 14 可知，梨树断陷沙河子组和火石岭组主要分布Ⅱ类原油与混源油，但其分布规律与营城组明显不同。七棵树、太平庄地区及其以北均分布混源油，其南侧直至深凹带区域，均分布Ⅱ类原油，Ⅱ类原油的分布范围明显较混源油大。

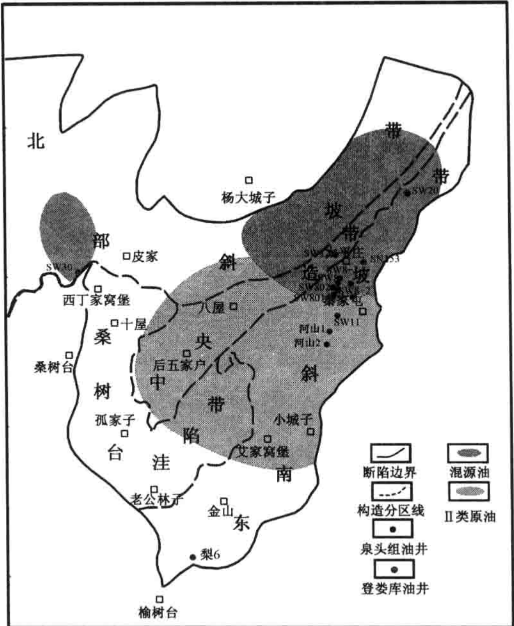


图 5 - 14　梨树断陷沙河子组和火石岭组油藏不同类型原油分布图

二、天然气分布特征

梨树断陷天然气分布整体靠近深洼区，平面上，煤成气与油型气的混源气主要分布在中央构造带的孤家子气田的 GK21 井、GK18 井、GK4 井，后五家户油气田的 HD20 - 18 井和 HD26 - 17井及东南斜坡带的新立油气田（图 5 - 14），其中 GK21 和 GK18 井邻近桑树台洼陷带，新立油气田的三口井和 GK4 井则相距不远，均位于东南斜坡带的中间部位；后五家户油气田的两口井位于中央构造带的南部，靠近桑树台洼陷带。

纵向上孤家子气田 3 个天然气样品所涉及层位分别为 K_1q_1 和 K_1d，后五家户气田为 K_1q_1，新立油气田均来自 K_1q_1，从中可看出，这些煤成气与油型气的混源气均采自下白垩统登娄库组及泉头组下段，可能与其成藏期有关。

除上述区域外，目前研究的梨树断陷天然气均为不同成熟度油型气的混合，在断陷内广泛分布。

第六章　油气运移与聚集特征

原油在运移、聚集过程中,必然存在一定原油化学组成的变化。原油的这种非均质性可以用来推测油气的运聚方向与距离和油气的成藏期次,结合流体包裹体的特征,可进一步确定油气的成藏期次与时间。由此,可以将油气的生成、运移、聚集和成藏历史进行动态还原。本章将利用梨树断陷原油的含氮化合物组成和成熟度参数、油藏烃类组成特征以及储层岩石流体包裹体特征,厘定油气藏成藏期次与时间,建立梨树断陷原油运聚模式。

第一节　油气成藏期次

一、油藏烃类非均质性与成藏期次

(一)储层烃的成因类型

储层烃是指油砂抽提物中可溶烃,与油藏中原油地球化学特征相同。在储层烃地球化学特征研究中,笔者从储层烃生物标志化合物组合特征出发,可以明显将储层烃也划分为Ⅰ类油、Ⅱ类油和混源油,储层烃的成因分类与梨树断陷原油的成因分类是一致的。

1. Ⅰ类油

Ⅰ类储层烃的生物标志化合物特征表现为长链三环萜烷不发育,其 C_{28} 和 C_{29} 三环萜烷丰度很低,Ts 丰度与 Tm 相当,C_{29}Ts 和 C_{30}重排藿烷丰度也较低,伽马蜡烷含量中等(图 6－1),这些分子组成特征与梨树断陷Ⅰ类原油的地球化学特征相同。实际上这类储层烃在区域地质分布上较为广泛,富集于双龙、秦家屯和八屋等地区,但纵向层位上主要储层分布于泉头组、登娄库组和营城组储层中,相对而言一般多为浅层储层。

2. Ⅱ类油

Ⅱ类储层烃的分子组成特征与Ⅰ类存在明显差异。生物标志化合物明显表现出高含量的 Ts、C_{29}Ts、C_{30}重排藿烷和伽马蜡烷,长链三环萜烷异常发育且 C_{28}和 C_{29}三环萜烷丰度较高(图 6－2),这些特征与梨树断陷Ⅱ类原油的地球化学特征是相同的,暗示它们有相同的母质来源。这类储层烃在北部斜坡带、八屋和秦家屯地区均有分布,与Ⅰ类储层烃在储层位上的最大差异是,Ⅱ类储层烃主要位于营城组和沙河子组等相对较深的储层中。

3. 混源油

储层烃中同样具有一类混源型原油,其分子组成特征介于Ⅰ类和Ⅱ类储层烃之间。如图 6－3 中,存在明显丰度的 C_{28}和 C_{29}三环萜烷,Ts 大于 Tm 的程度较Ⅱ类储层烃偏小,可见较高含量的 Ts、C_{29}Ts、C_{30}重排藿烷和伽马蜡烷,其含量明显处于Ⅰ类和Ⅱ类储层烃之间。甾烷分布中,$C_{29}\alpha\beta\beta$ 化合物含量较高。上述这些特征揭示了该类油应该为Ⅰ类和Ⅱ类储层烃混合的产物。该类储层烃平面上在北部斜坡、八屋、四五家子和秦家屯地区均有分布,层位上主要集中于登娄库组和营城组,纵向上也表现出位于Ⅱ类储层烃分布的深层与Ⅰ类储层烃分布的浅层之间。

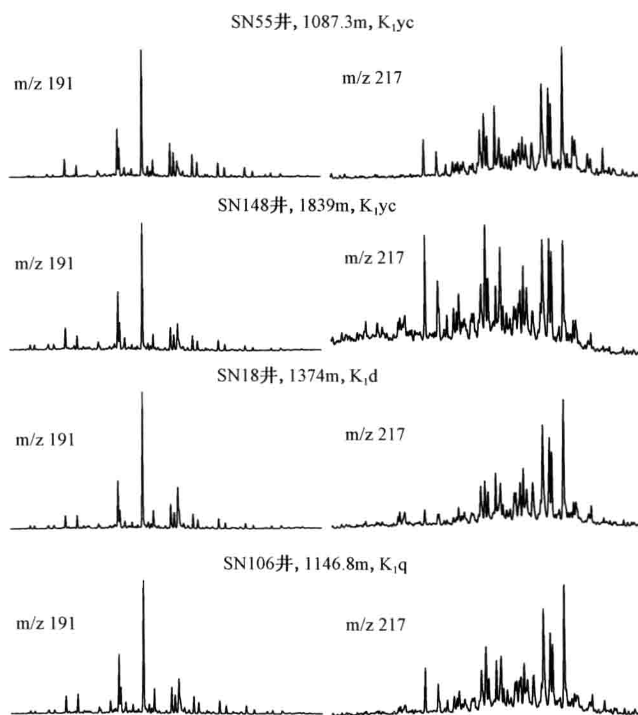


图6-1　梨树断陷储层烃Ⅰ类油 m/z 191 和 m/z 217 质量色谱图

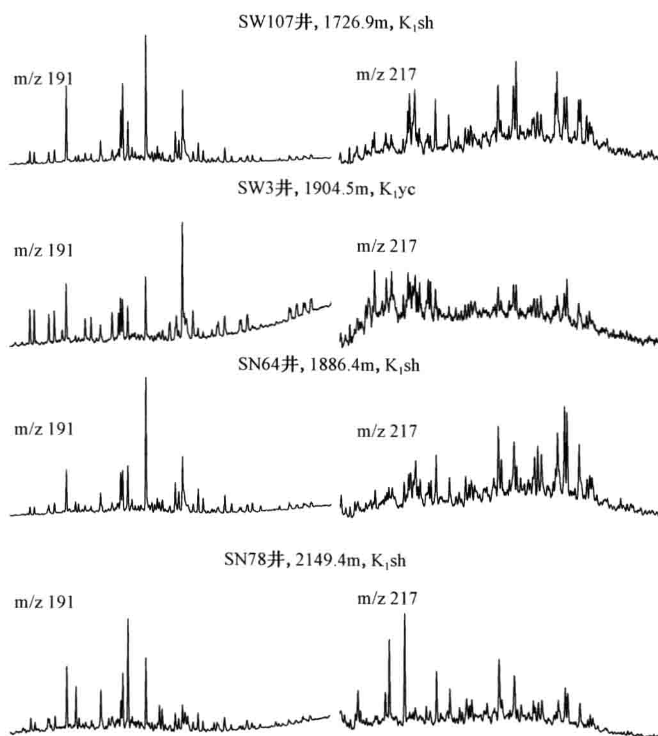


图6-2　梨树断陷储层烃Ⅱ类油 m/z 191 和 m/z 217 质量色谱图

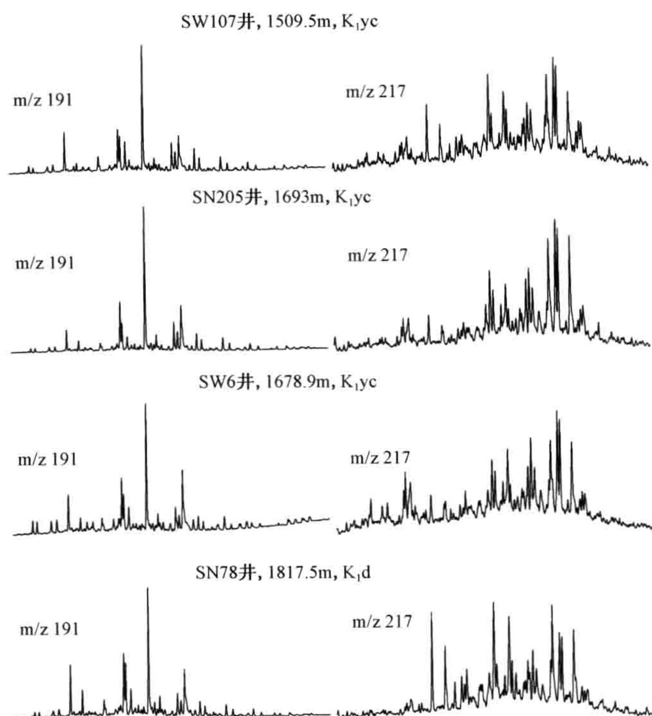


图 6－3 梨树断陷储层烃混源油 m/z 191 和 m/z 217 质量色谱图

（二）储层烃与成藏期次

1. 烃类宏观组成

储层烃宏观组成的非均质性可以揭示石油在聚集成藏中发生的一些地球化学作用。梨树断陷储层烃宏观组成表现出明显的非均质性，并存在三种分布模式：其一是色谱基线平直、正构烷烃分布完整；其二是色谱基线发生明显隆起并形成“鼓包”（UCM），正构烷烃已消耗殆尽；其三是在隆起的色谱基线上发育完整的正构烷烃化合物。通常认为原油在遭受强烈生物降解作用后，正构烷烃与低分子量的环烷烃及异构烷烃被损失掉，而高分子量的非烃与沥青质成分相对富集，致使色谱基线隆起形成难以分辨的化合物（鼓包 UCM），因此原油色谱基线发生明显隆起并形成“鼓包”是指该原油曾遭受过严重的生物降解作用。实际上原油一经生物降解，即使是轻度的生物降解作用，也会导致正构烷烃化合物部分抑或全部丧失，到严重生物降解时正构烷烃被消耗殆尽，色谱基线上只形成“鼓包”。故此原油色谱基线隆起并形成“鼓包”上如发育连续、完整和高丰度正烷烃系列化合物，表明该油藏至少存在两期原油的充注过程，第一期充注的原油经历了强烈的生物降解作用，使得原油正构烷烃被消耗殆尽，色谱基线隆起形成“鼓包”；而后期充注的石油具有完整的正构烷烃系列化合物，这些原油并没有发生生物降解作用。

梨树断陷登娄库组储层烃宏观组成特征表征原油曾遭受过严重的生物降解作用和原油二次充注过程（图 6－4）。双龙次凹 SN117 井浅层 617.18m 油砂样品储层烃色谱基线隆起，缺失正构烷烃，说明最初充注的原油经历了强烈的生物降解作用，后期没有二期原油的再充注，是一期成藏的结果。而八屋地区 SN18 井储层烃除色谱基线具有明显的“鼓包”特征外，还存

在一定含量的正构烷烃，且正构烷烃分布较完整，揭示 SN18 井储层经历过两期石油的充注过程，即第一期充注的原油被强烈生物降解作用，而第二期充注的原油并没有发生生物降解，所以保存完整的正构烷烃化合物。此外 SN22 井和 SN78 井储层烃仅发生轻微的生物降解作用，是原油一期充注的产物。

与登娄库组储层相比营城组储层烃宏观组成特征存在两种分布模式，一种是以北部斜坡地区 SN144 和秦家屯地区 SN105 井储层烃为例（图 6－5），烃类色谱基线“鼓包”上发育完整的正构烷烃系列化合物，揭示其至少经历了两期油气的充注。相反，对于八屋地区 SN205 井和双龙次凹 SW20 井储层烃而言，色谱基线平直，正构烷烃化合物分布烷烃且丰度高，说明该储层原油没有发生生物降解作用，只经历了一期的原油充注作用。

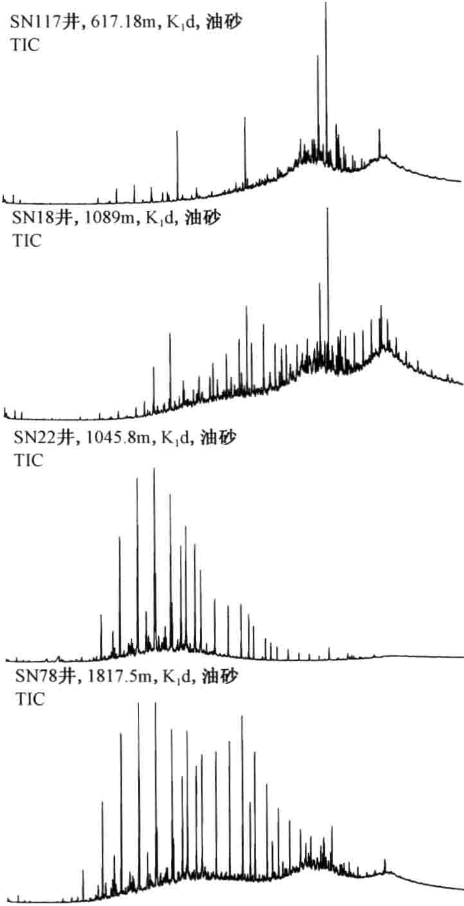


图 6－4　梨树断陷登娄库组储层烃正构烷烃分布图

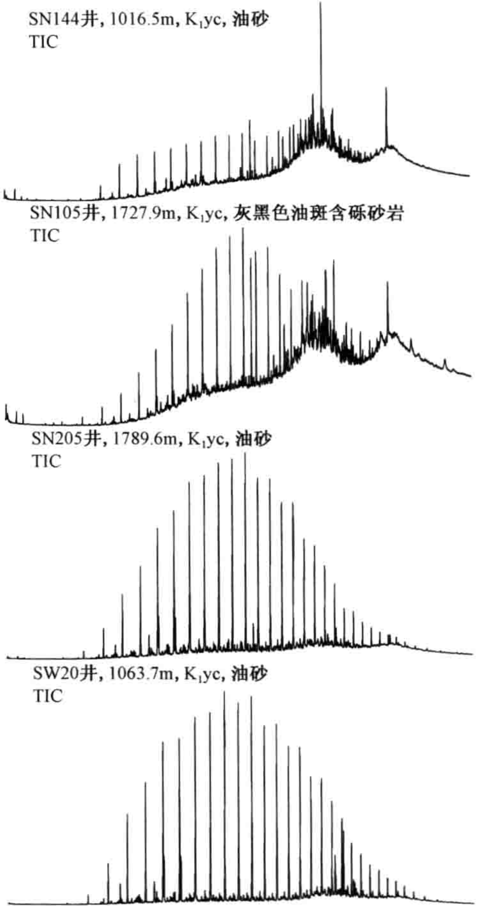


图 6－5　梨树断陷营城组储层烃正构烷烃分布图

沙河子组储层烃仅在 HS2 井和 SW12 井表现出轻微的生物降解痕迹，正构烷烃的碳数分布较营城组和登娄库组完整，丰度也较营城组和登娄库组更高（图 6－6）。王铁冠等（2004）曾在塔河油田成功尝试了运用 UCM 的面积与正构烷烃峰面积之和的比例来测算塔河油田生物降解前、后期充注原油的比例。根据这些特征，可明显看出梨树断陷沙河子组原油主要以后期充注原油为主，而登娄库组和营城组后期充注的原油强度相对较低。而 SN107 井和 SN78

井沙河子组储层烃并没有发生生物降解作用。此外，沙河子组原油多呈黄色和褐色凝析油与轻质油也佐证了笔者的研究成果。

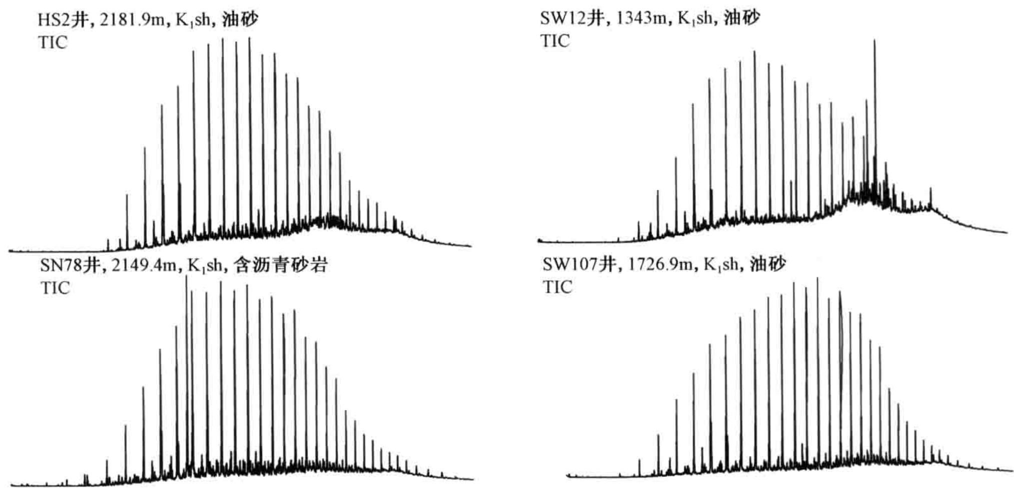


图 6－6　梨树断陷沙河子组储层烃正构烷烃分布图

综上所述，梨树断陷储层烃遭受生物降解作用的强度存在明显的差异。登娄库组储层烃普遍经历了生物降解作用，且浅层储层烃发生的生物降解强度要明显大于深层，营城组储层烃其次，而沙河子组储层烃生物降解作用非常有限。对于多期充注的储层而言，沙河子组储层主要以后期充注石油为主；而登娄库组储层和营城组储层在不同地区油藏中早期充注的石油与晚期充注的石油比例变化较大。

2. 储层烃和原油中 25－降藿烷的分布

原油中 25－降藿烷丰富程度常常作为判识其生物降解强度的标志（Peters 和 Moldwan，1993）。梨树断陷储层烃宏观组成特征研究表明，不同层位储层烃明显经历了生物降解作用，且存在生物降解前、后至少两期的充注过程。而梨树断陷部分原油中高含量的 25－降藿烷说明梨树断陷油气藏存在多期充注、多期成藏的过程。

选取泉头组和登娄库组部分原油与储层烃样品，分别从 m/z 191 和 m/z 177 质量色谱图上揭示 25－降藿烷的组成特征（图 6－7 和图 6－8）。秦家屯地区 QK1－3 井登娄库组原油从宏观组成上并没有发现有生物降解作用，但通过 m/z 191 和 m/z 177 质量色谱图可以明显看出，存在较高含量的 C_{28} 和 C_{29}25－降藿烷，表征原油曾遭受较为严重的生物降解作用。同样秦家屯地区 QK2－3 井和 QK3－1 井登娄库组原油也存在较高含量 C_{28} 和 C_{29}25－降藿烷，同样表征其曾受到较为严重的生物降解作用。

储层烃 m/z 191 和 m/z 177 质量色谱图中（图 6－8），秦家屯地区 SN106 井泉头组和登娄库组储层烃均存在较高含量的 C_{28} 和 C_{29}25－降藿烷分布，与原油表现出一致的特征，说明秦家屯地区泉头组和登娄库组原油确实经历过较严重的生物降解，进一步结合其较为完整的正构烷烃分布特征，笔者认为该区泉头组和登娄库组原油至少经历了两期原油的充注。通过色谱基线形成的“鼓包”UCM 和正构烷烃的比例相互关系判断，后期充注原油占据现今原油组成的主体。

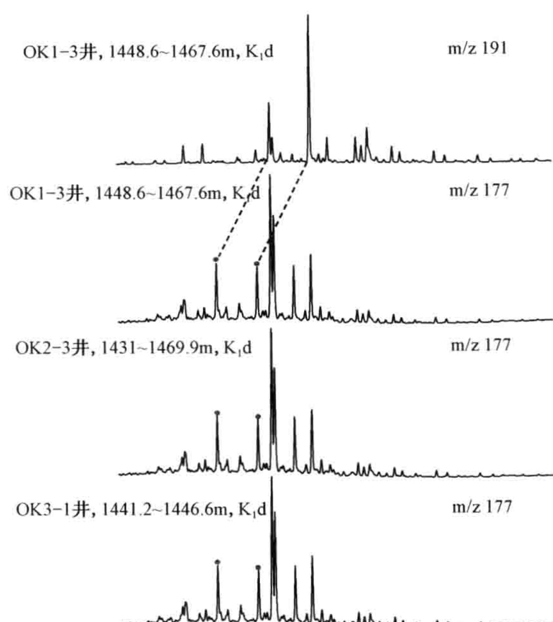


图 6－7　梨树断陷秦家屯部分原油 m/z 191 和 m/z 177 质量色谱图

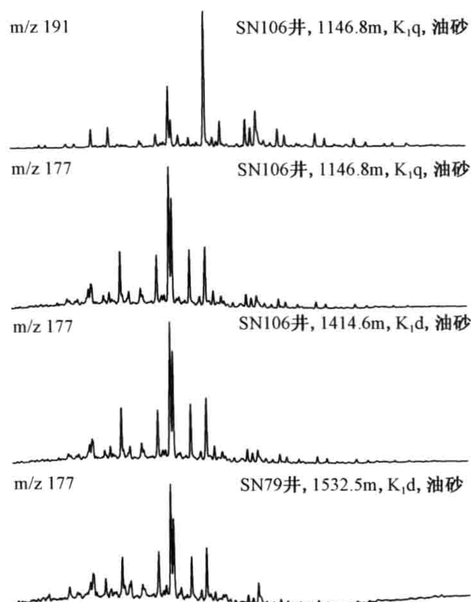


图 6－8　梨树断陷部分储层烃 m/z 191 和 m/z 177 质量色谱图

（三）原油成熟度与成藏期次

石油在运移聚集成藏过程中，其总体组成和分子参数在油区范围内（纵向上和横向上）存在着一定的非均质性。这种非均质性一方面是由于区域地质背景、烃源岩沉积环境和展布范围以及油气聚集成藏之后的各种次生蚀变作用所致；而另一方面就单一油藏而言，同一烃源岩不同时期产生的油气以及不同烃源岩在同一时期生成的油气在总体组成和成熟度参数上亦具有内在的差异性。也就是说烃源岩在渐进性的埋藏过程中，将经历更加成熟的热演化历史，这样由同一烃源岩在不同时期排驱出来的油气在其性质尤其是成熟度上存在着一个逐渐增大的趋势。此外，烃源岩在同一时期生成的油气其成熟度亦有明显的差异。这样若这些烃源岩区与运移通道和圈闭具有时空上的匹配关系，那么烃源岩中排出的油气就可能聚集成油气藏，并能反映出油气聚集成藏过程与期次。

利用原油芳香烃甲基菲指数（MPI_1）和甲基二苯并噻吩比值（4－MDBT/1－MDBT）刻画了梨树断陷不同类型原油成熟度参数变化特征（图 6－9）。由图可知来源于营城组烃源岩的Ⅰ类原油甲基菲指数（MPI_1）和甲基二苯并噻吩比值分布范围明显位于低值区，甲基菲指数（MPI_1）和 4－MDBT/1－MDBT 比值主峰分别位于 0.4～0.6 和 2.0～4.0 之间，表明属于正常成熟程度的原油；相反来源于沙河子组烃源岩的Ⅱ类原油这两个参数分布于高值区，主峰分别位于 0.8～1.0 和 > 8.0 区域，揭示这些原油是烃源岩在高演化阶段的产物；而混源油的成熟度参数则明显位于Ⅰ类原油与Ⅱ类原油之间，成熟度参数值主峰分别位于 0.6～0.8 和 4.0～6.0 之间。由此可知，梨树断陷原油为不同烃源岩不同成熟阶段生成的原油及其混源产物，明显存在至少两期成藏过程与聚集期次。

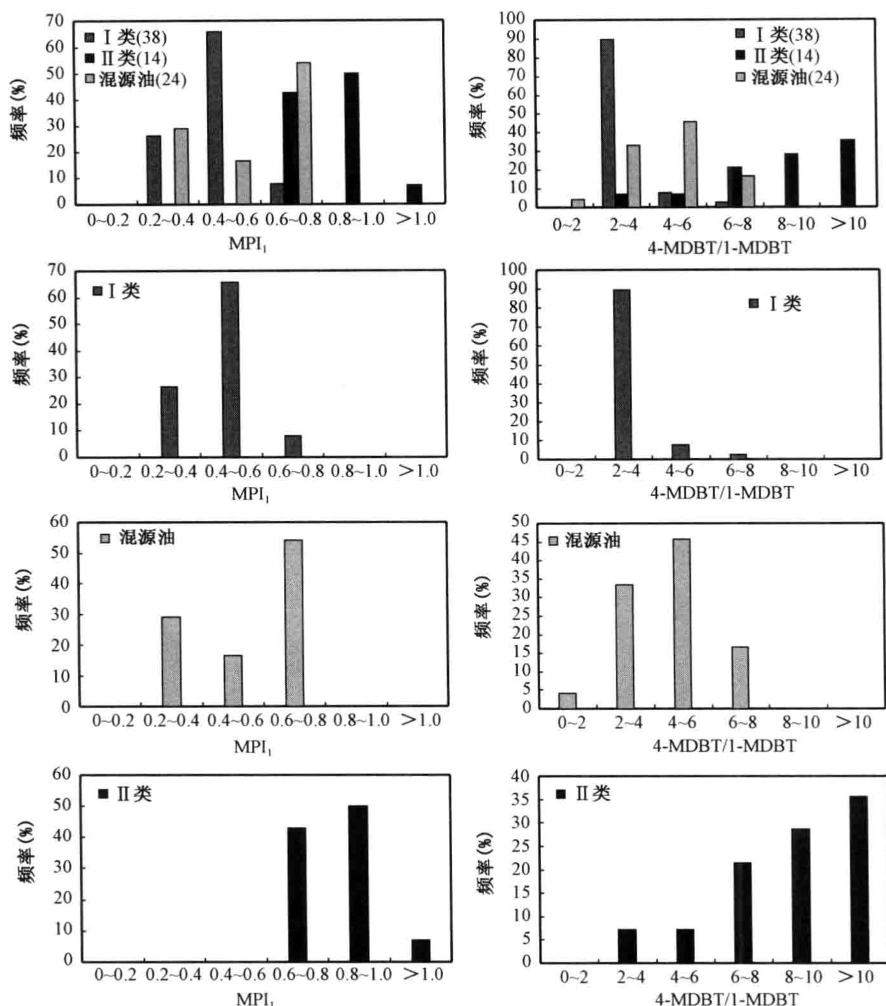


图6－9 梨树断陷不同类型原油成熟度参数分布图

二、流体包裹体与成藏期次

20世纪80年代后期，包裹体技术开始用于我国的油气勘探，特别在最近二十多年来备受石油地质学家的重视，这是因为流体包裹体的封闭性能好，一般不受油藏后期次生变化的影响，记录了油气充注成藏时古油气的成分、温度和压力条件。通过对流体包裹体岩相学鉴定、荧光特征、均一温度测定和成分分析，可以重建油气成藏史，探讨油气运移、聚集成藏规律。

（一）北部斜坡地区成藏期次

梨树断陷北部斜坡带紧邻断陷生烃洼陷，杨大城子呈弧形东西向展布。目前对该区研究较多资料较全的井主要位于斜坡带的北部和中部，笔者选取具有代表性的SW3井和SN144井的作为研究对象。

1. 流体包裹体特征

在北部斜坡地区营城组砂岩粒间空隙中普遍充填深褐色稠油沥青，显示暗褐色荧光，主要

发育次生烃类包裹体(图6-10、图6-11)。包裹体共有两期,从其特征来看均已达到成熟,但是运移规模则表现为第二期远远小于第一期。



图6-10 北部斜坡地区沿石英颗粒成岩早期微裂隙分布粒及其加大边的成呈淡黄色—灰色的气液烃包裹体

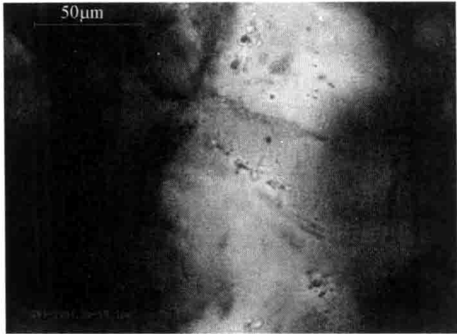


图6-11 北部斜坡地区沿切穿石英颗岩期后微裂隙成带分布,呈无色、淡黄色—灰色的液烃、气液烃包裹体

2. 流体包裹体均一化温度

根据北部斜坡地区储层砂岩样品中盐水包裹体均一温度测试结果,绘制出均一温度分布直方图(图6-12),通过分析得到SN144井营城组储层盐水包裹体均一温度分布范围为:59~72℃;SW3井营城组储层盐水包裹体均一温度分布范围为:76~115℃。

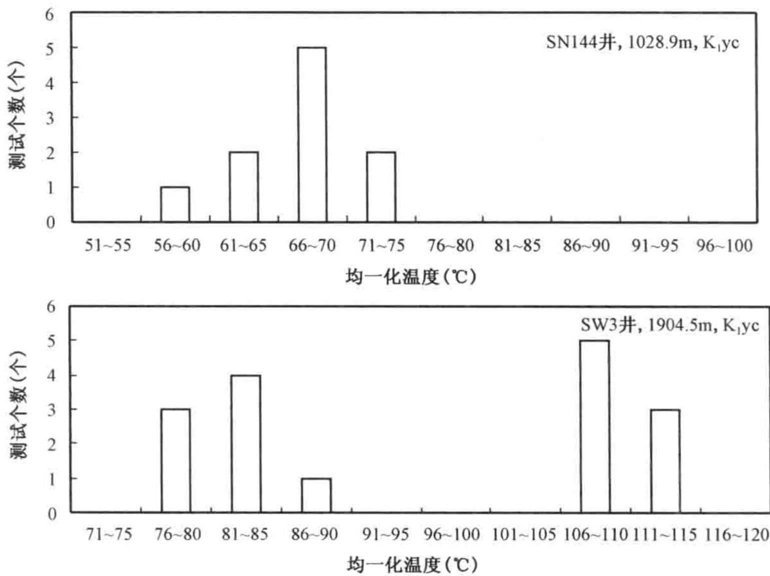


图6-12 梨树断陷北部斜坡地区SN144和SW3井包裹体均一化温度分布直方图

SN144井位于梨树断陷北部斜坡边缘,位置上较靠近杨大城子凸起,在构造演化过程中沉积厚度较薄、剥蚀严重。从该井营城组储层盐水包裹体均一温度直方图来看,该井油气藏聚集期温度的主峰区范围为65~72℃。结合SN144井时间—温度埋藏史图(图6-13),可得到对

应该温度范围的地史时间是104—100Ma,由此可以知SN144井营城组充注成藏主要发生在泉头期。

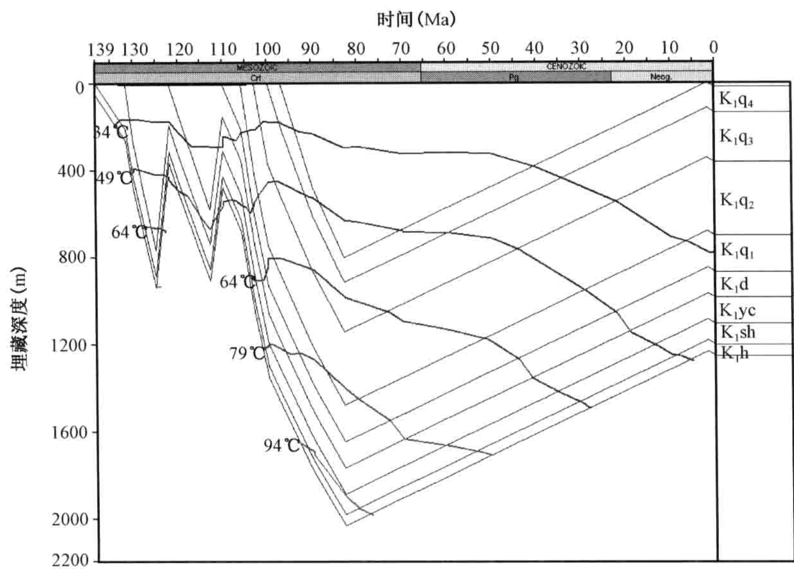


图6-13 梨树断陷北部斜坡SN144井时间—温度埋藏史图

SW3井位于是北部斜坡中部,目前所开发的油气藏属于地层油气藏。从SW3井营城组储层盐水包裹体测温结果来看,均一温度有两个主峰区,分别为76~86℃和107~115℃区域。根据该井时间—温度埋藏史图(图6-14)可知,该井营城组的油气充注开始于107—105Ma和103—102Ma,即SW3井营城组油藏成藏时间为泉头期。

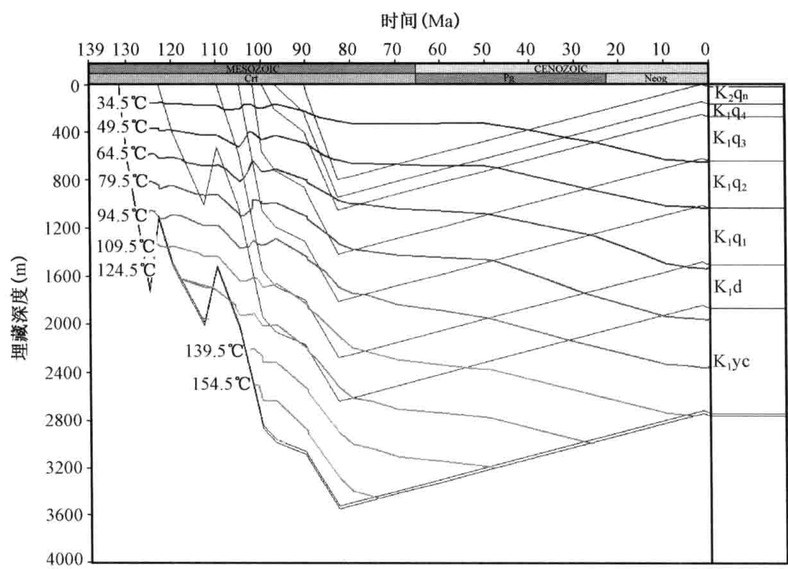


图6-14 梨树断陷北部斜坡SW3井时间—温度埋藏史图

(二)后五家户地区成藏期次

后五家户地区构造上位于梨树断陷中央构造带北部,构造位置相对较低,所经受构造隆升作用相对较弱,地层埋藏较深,沉积厚度较大,经受的剥蚀作用较弱,地层保存相对完整。

1. 流体包裹体特征

后五家户地区登娄库组砂岩中粒间空隙含中轻质油,普遍显示黄绿色荧光,部分粒间空隙中充填深褐色、黑褐色沥青,无荧光显示。主要发育了两期油气包裹体:第一期发育于石英颗粒成岩次生加大早中期,发育丰度高(GOI 为 5% ±),均为环石英颗粒加大边内侧成带分布或沿切穿石英颗粒次生加大边的微裂隙成带状分布。包裹体内液烃呈淡褐黄色、深褐色为主,显示暗褐色荧光;包裹体内气烃呈灰色,无荧光显示(图 6-15)。其中,液烃包裹体占 60% ±,气液烃包裹体占 40% ±。分析认为这一期烃类已达到成熟阶段,并且运聚规模相对较大。第二期包裹体主要发育于石英颗粒成岩次生加大期后,发育丰度中等(GOI 为 3% ±),沿长石颗粒、石英颗粒成岩期后微裂隙或切穿石英颗粒及其次生加大边的微裂隙成带状分布。包裹体内液烃呈无色、淡(褐)黄色、深褐色为主,显示绿色、暗褐色荧光;包裹体内气烃呈灰色,无荧光显示(图 6-16)。其中,液烃包裹体占 60% ±,气液烃包裹体占 35% ±,气烃包裹体占 5% ±。由此认为第二期包裹体烃类相对第一期成熟度更高,但运聚规模相对要小。在对后五家户地区营城组样品研究中发现,该地区 SN79 井区包裹体内烃类成熟度要低于 SN80 井区,而运聚规模则是 SN80 井区要大于 SN79 井区。

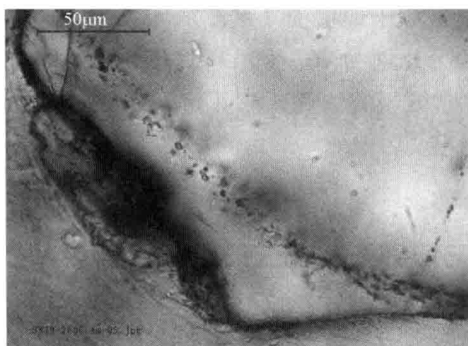


图 6-15 环石英颗粒加大边内侧成带分布呈深褐色、灰褐色的液烃、气液烃包裹体与呈淡褐色的含烃盐水包裹体(后五家户地区)

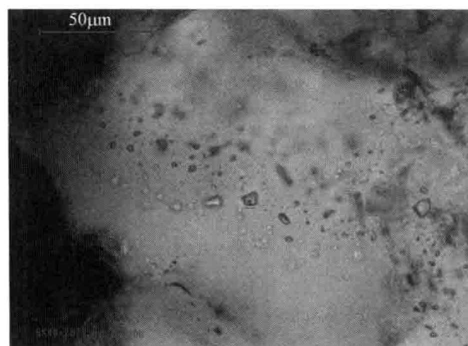


图 6-16 沿切穿石英颗粒的微裂隙成带分布,呈淡褐色的含烃盐水包裹体(后五家户地区)

2. 流体包裹体均一化温度

根据该地区储层砂岩包裹体均一温度来看,SN79 井登娄库组储层盐水包裹体均一温度分布范围在 77 ~ 99℃左右;SN80 井营城组 2679.4m 样品盐水包裹体均一温度分布范围在 90 ~ 125℃;营城组 3174.7m 样品盐水包裹体均一温度分布范围在 90 ~ 139℃之间(图 6-17)。

SN79 井位于后五家户地区最北部,根据该井登娄库组储层盐水包裹体均一温度分布,其主峰区范围为 80 ~ 89℃,在 SN79 井时间—温度埋藏史图上(图 6-18),该温度区间所对应的时间为 106 ~ 101Ma,从而得到 SN79 井登娄库组油气成藏时间为泉头期。

SN80 井营城组 2679.4m 样品盐水包裹体温度主峰区分别为 90 ~ 97℃和 106 ~ 118℃区

域。将此温度区间投影到 SN80 井埋藏史图上即可得到该井营城组油气成藏时间为 118—116Ma 和 120—119Ma（图 6-19），因此可判断 SN80 井营城组油气成藏时期为登娄库期。

SN80 井营城组 3174.7m 样品盐水包裹体均一温度主峰区分别为 90～97℃和 110～120℃区域，在 SN80 井时间—温度埋藏史图中可以找到对应时间分别为 118—116Ma 和 120—119Ma，从而可知 SN80 井营城组油气成藏时期在登娄库期（图 6-19）。

由 SN79 井和 SN80 井流体包裹体研究成果揭示，后五家户地区登娄库组油气成藏主要在泉头期，而营城组油气成藏主要在登娄库期。

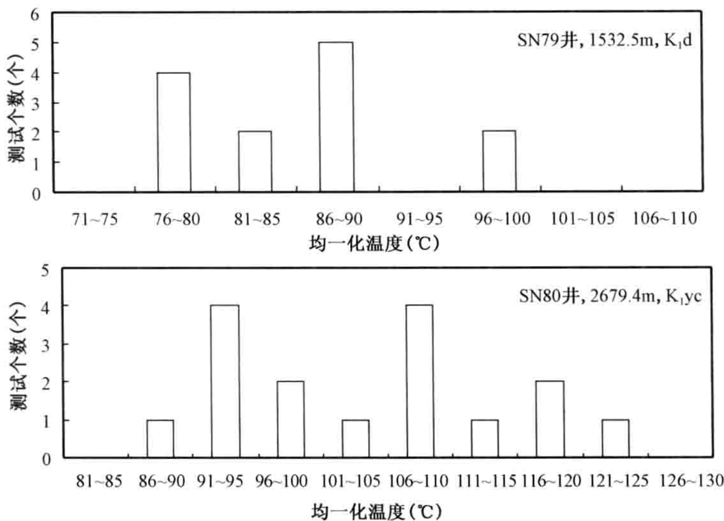


图 6-17　梨树断陷后五家户地区 SN79 和 SN80 井包裹体均一化温度直方图

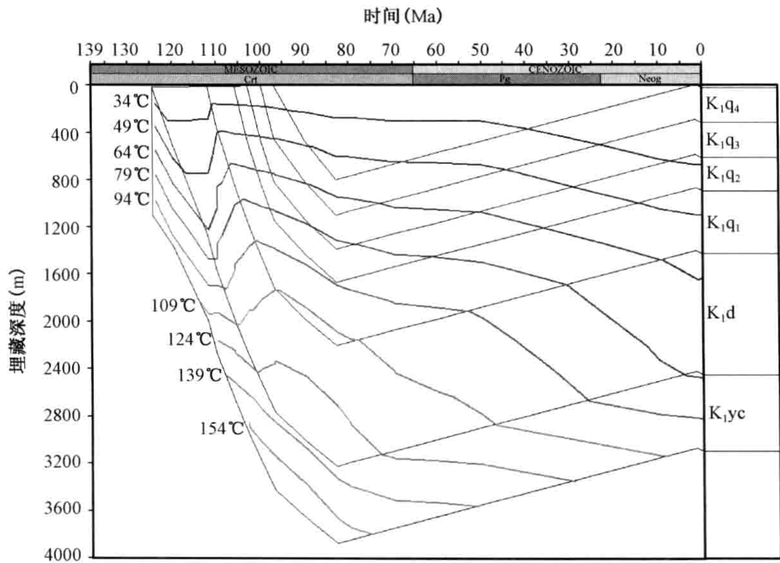


图 6-18　梨树断陷后五家户地区 SN79 井时间—温度埋藏史图

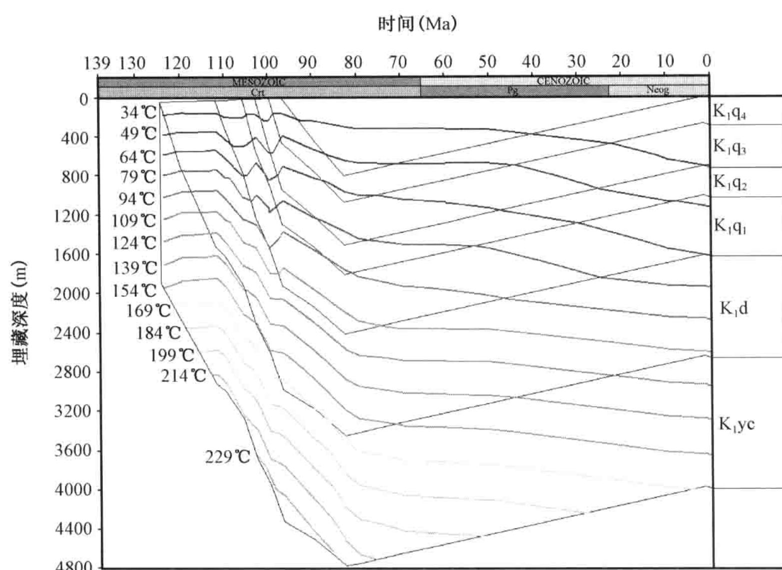


图6-19　梨树断陷后五家户地区SN80井时间—温度埋藏史图

(三)八屋地区油气成藏期次

八屋地区是梨树断陷最早发现油气的地区之一,构造上位于梨树断陷中央构造带中部,主要为一个构造较为复杂、小断层较多的背斜构造。沉积地层层位较多,单层沉积厚度相对较薄,各层间接触关系由于构造作用而导致不整合接触较多,其中营城末期和登娄库末期由于构造作用遭受了较为严重的剥蚀。

1. 流体包裹体特征

八屋地区储层流体包裹体样品在平面和纵向上分布较均匀,并具有一定的代表性。流体包裹体镜下观测,发现在该地区登娄库组和营城组砂岩局部粒间空隙含中轻质油,显示蓝绿色荧光,而沙河子组砂岩荧光显示微弱。并且砂岩中大部分粒间空隙充填深褐色稠油沥青,无荧光显示。砂岩内石英颗粒成岩次生加大边内不发育原生的烃类包裹体,主要有两期油气包裹体存在:

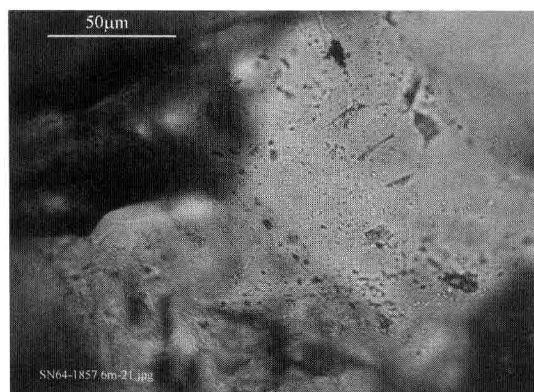


图6-20　沿石英颗粒成岩早中期微裂隙成带分布,呈淡褐色—灰色的液烃、气液烃包裹体(八屋地区)

第一期油气包裹体主要发育于石英颗粒成岩次生加大早中期,发育丰度极高,GOI高达25% ±,包裹体均为环石英颗粒加大边内侧或沿切及石英颗粒次生加大边的微裂隙成带状分布。包裹体内液烃呈淡褐色、淡褐黄色、深褐色为主,显示浅黄色、蓝绿色、绿色、黄绿色、暗褐色荧光;包裹体内气烃呈灰色,无荧光显示(图6-20)。其中液烃包裹体占60% ±,气液烃包裹体占40% ±。上述特征表明这一期是成熟油气的一次较大规模的运移。

第二期油气包裹体主要发育于石英颗粒成岩次生加大期后或方解石胶结期后，其中登娄库组和营城组发育丰度较低，沙河子组发育丰度略高于第一期。包裹体主要为溶蚀成因、成群分布于长石颗粒中，或沿石英、长石颗粒成岩期后微裂隙或切穿石英颗粒及其次生加大边的微裂隙成带状分布。包裹体内液烃呈淡黄色、淡褐黄色、深褐色为主，显示绿色、黄绿色、暗褐色荧光；包裹体内气烃呈灰色，无荧光显示（图 6－21）。在登娄库组和营城组中的包裹体中，液烃包裹体占 40% ~70%，气液烃占 30% ~60%；在沙河子组砂岩中观测到的包裹体中液烃包裹体占 60% ±，气液烃包裹体占 35% ±，气烃包裹体占 5%。从以上特征来看，在八屋地区该期包裹体烃类在纵向上运移规模和成熟度有一定的差异，其中登娄库组和营城组成熟度较低、运移规模较小，而沙河子组的包裹体烃类成熟度则较高、运移规模也较大。

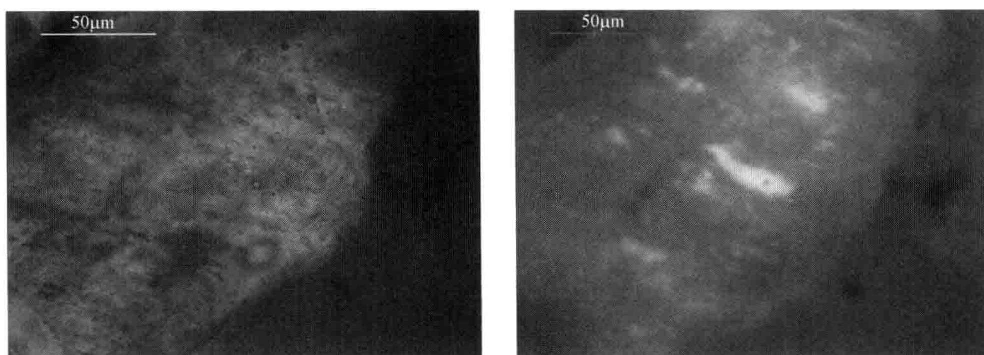


图 6－21　长石颗粒中溶蚀成因、成群分布、呈淡褐黄—灰色的气液烃包裹体显示黄色荧光（八屋地区）

2. 流体包裹体均一化温度

八屋地区储层流体包裹体样品盐水包裹体均一化温度以 SN64 井为代表，营城组储层盐水包裹体均一温度分布范围在 71 ~102℃；SN64 井沙河子组储层盐水包裹体均一温度分布范围在 80 ~109℃（图 6－22）。

SN64 井位于梨树断陷八屋地区，该井营城组储层盐水包裹体均一温度主要存在两个主峰区，分别为 72 ~82℃和 96 ~102℃区域。根据 SN64 井时间—温度埋藏史分析可知该井营城组油气充注的主要时间为 105 ~102Ma、100 ~97Ma，该井营城组油气成藏时期为泉头期（图 6－23）。

由 SN64 井沙河子组储层盐水包裹体均一温度分析来看，该样品包裹体均一温度主峰区分别为 80 ~86℃和 96 ~106℃区域。结合图 6－23 时间—温度埋藏史图可知，沙河子组油气藏聚集时间分别为 116 ~112Ma、108 ~104Ma，因此，SN64 井沙河子组油气成藏时期分别为登娄库末期和泉头期。

（四）双龙地区油气成藏期次

双龙地区位于梨树断陷东北部，该地区构造位置特殊，资料较全的 SN22 井和 SN117 井构造上处于东南斜坡北段，为该区边缘位置，呈 NE 向展布，该地区受断裂的控制作用不明显，具有独立成盆的特征。在沙河子—营城期为其沉降的主要时期，沉积相对稳定，地层向边部有超覆、剥蚀等现象，其中营城组末期和登娄库组末期遭受较为严重剥蚀。

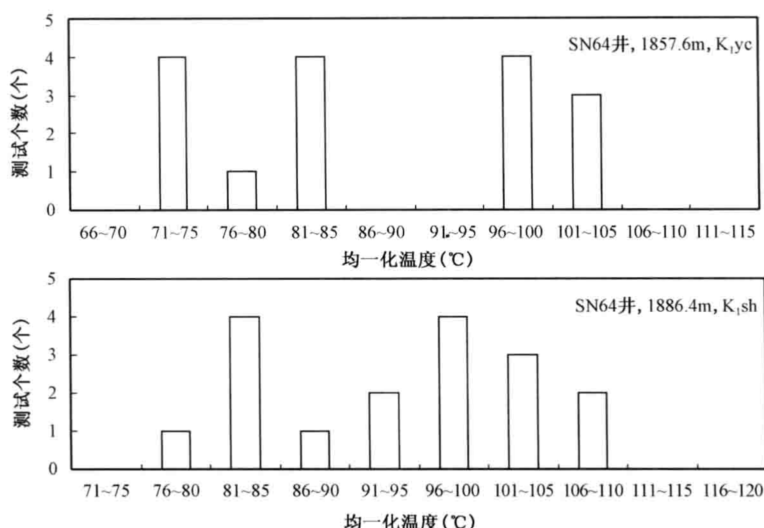


图 6－22　梨树断陷八屋地区 SN64 井包裹体均一化温度分布直方图

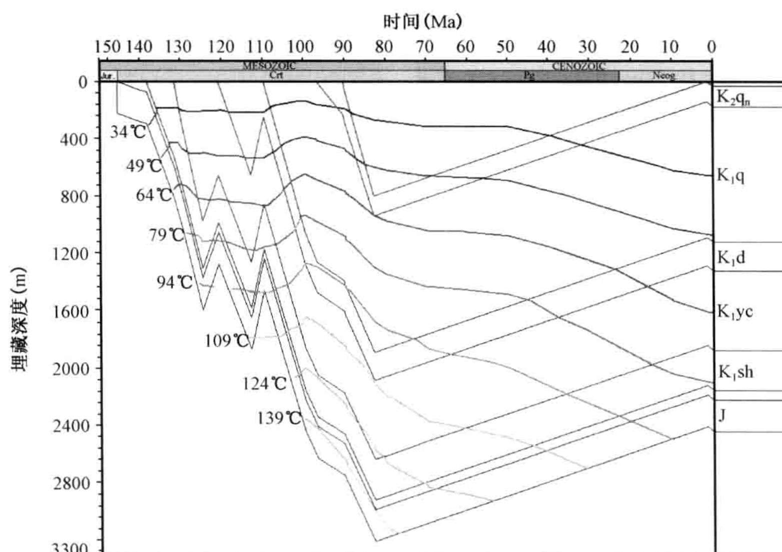


图 6－23　梨树断陷八屋地区 SN64 井时间—温度埋藏史图

1. 流体包裹体特征

双龙地区登娄库组砂岩粒间空隙中充填的杂基和黏土吸附原油，显示黄色、黄绿色荧光。部分砂岩粒间空隙中充填褐黄色稠油，显示暗褐色荧光，主要发育有一期次生烃类包裹体：这一期包裹体主要发育于石英颗粒次生加大期后，丰度较低(GOI 为 1% ±)。包裹体均为沿长石颗粒、石英颗粒成岩期后微裂隙或切穿石英颗粒及其次生加大边的微裂隙成带状分布。包裹体内液烃呈淡黄色、深褐色为主，显示黄色、暗褐色荧光；包裹体内气烃呈灰色，无荧光显示(图 6－24、图 6－25)。其中，液烃包裹体占 60% ±，气液烃包裹体占 40% ±。从以上特征来看，该地区烃类成熟度相对较低，运移规模较小。

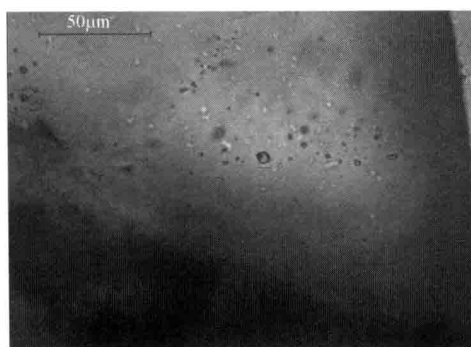


图6－24　沿石英颗粒微裂隙分布呈淡褐色的含烃盐水包裹体（双龙地区）

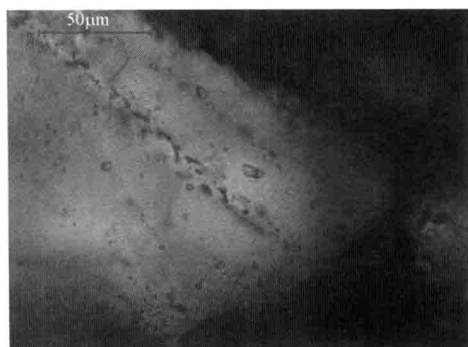


图6－25　沿切穿石英颗粒的微裂隙成带分布，呈淡褐色的含烃盐水包裹体（双龙地区）

营城组砂岩大部分粒间孔隙含中轻质油，显示黄绿色荧光，缺乏轻质油的粒间孔隙中充填深褐色稠油沥青，显示暗褐色荧光。该岩只发育一期油气包裹体：包裹体主要发育于方解石胶结物充填期后，发育丰度中等（GOI 为 3% ±），均为沿长石颗粒、石英颗粒成岩期后微裂隙或成带分布于方解石胶结物中。包裹体内液烃呈无色、深褐色为主，显示蓝色、暗褐色荧光；包裹体内气烃呈灰色，无荧光显示。其中，气液烃包裹体占 40% ±，气烃包裹体占 60% ±。由此可以看出营城组中包裹体烃类已达到成熟—过成熟阶段，运聚规模也相对登娄库组要大。

2. 流体包裹体均一化温度

根据双龙地区储层样品盐水包裹体均一温度测试结果，应用包裹体均一温度数据作出均一化温度分布直方图，通过分析可得到 SN117 井登娄库组盐水包裹体均一化温度分布范围为 60～87℃；SN22 井登娄库组盐水包裹体均一化温度分布范围为 67～84℃（图6－26）。

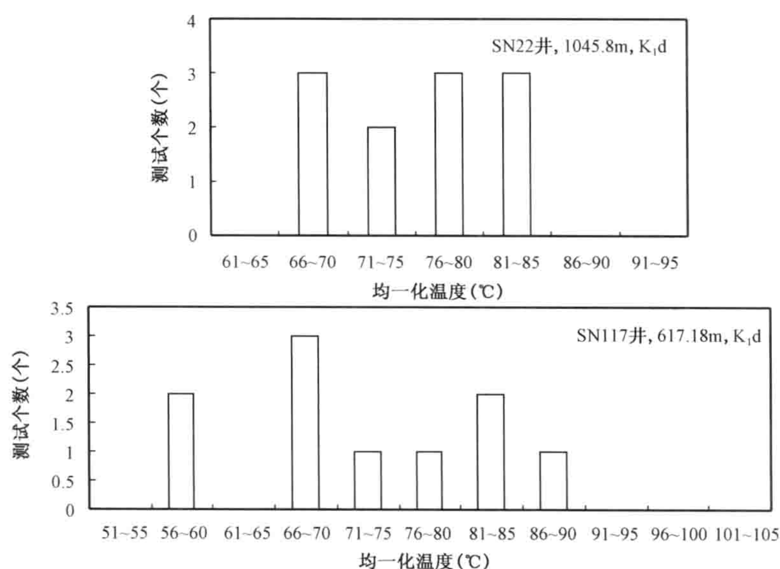


图6－26　梨树断陷双龙地区 SN22 井和 SN117 井包裹体均一化温度分布直方图

从 SN22 井流体包裹体均一化温度测试结果来看，该井登娄库组储层盐水包裹体均一化温度主峰区位于 70～80℃区间，根据 SN22 井时间—温度埋藏史图可知，该井登娄库组油气成藏时期主要在 98—86Ma，SN22 井登娄库组油藏成藏时期在泉头末—嫩江期（图 6－27）。

SN117 井登娄库组储层盐水包裹体均一化温度主峰位于 66～85℃左右，其所对应的地质时间范围大概在 100—85Ma，因此 SN117 井登娄库组油气成藏时期为泉头末期—嫩江期（图 6－28）。

从以上两口井非常一致的研究结果可发现，双龙地区登娄库组油气成藏时期应当为泉头末期—嫩江期。

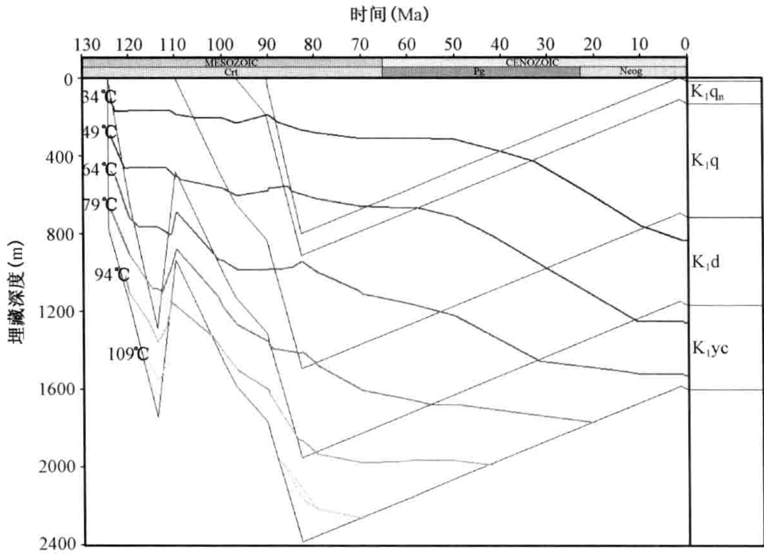


图 6－27　梨树断陷双龙地区 SN22 井时间—温度埋藏史图

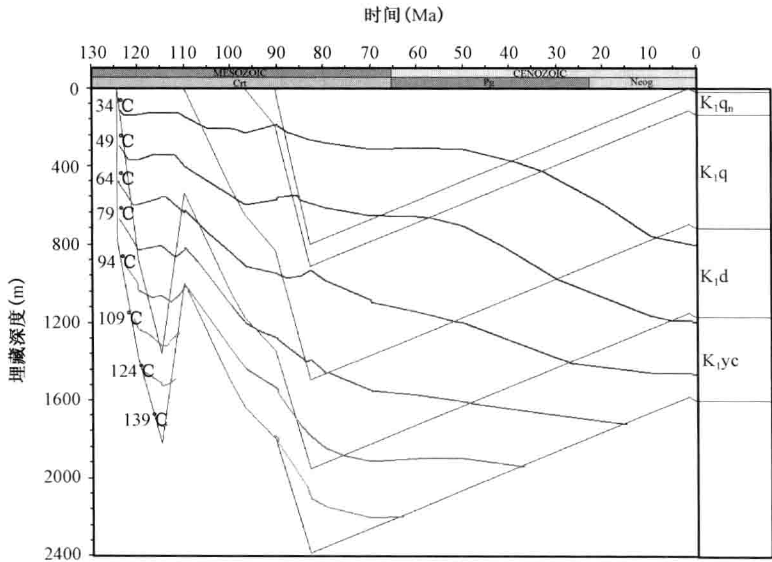


图 6－28　梨树断陷双龙地区 SN117 井时间—温度埋藏史图

(五)秦家屯地区油气成藏期次

秦家屯地区位于梨树断陷东南斜坡构造带上,为一大型鼻状构造,油气成藏条件十分有利,具有形成中型油气藏的地质背景和条件。

1. 流体包裹体特征

秦家屯地区登娄库组、营城组、沙河子组储层砂岩流体包裹体总体特征:该地区砂岩大部分粒间空隙充填深褐色稠油沥青,无荧光显示,但砂岩局部粒间空隙含中轻质油,显示蓝色荧光,砂岩内包裹体有两期发育:

第一期油气包裹体主要发育于石英颗粒成岩早中期,为沿石英颗粒成岩早期的微裂隙或环石英颗粒加大边内侧成带分布,发育丰度很高,但是在纵向和平面上分布又有明显的渐变过程,在纵向上以登娄库组丰度最高,GOI 高达 60% ±,以营城组最低,GOI 最低为 4% ±;在平面上从 SN78 井到 SN148 井 GOI 迅速降低,由此可看出在秦家屯地区油气运移规模从西南向东北方向逐渐减小,究其原因是由于油气运聚方向为由西南向东北方向运移的结果。从观测到的包裹体来看该地区包裹体内液烃呈现淡黄色、深褐色为主,显示黄色、黄绿色、暗褐色荧光;包裹体内气烃呈灰色,无荧光显示(图 6-29、图 6-30)。其中,液烃包裹体占 60% ±,气液包裹体占 40% ±。以上特征表明此期包裹体烃类已进入成熟阶段。

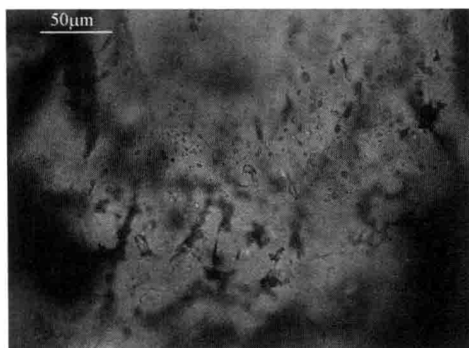


图 6-29　沿石英颗粒成岩早期的微裂隙成带分布呈淡褐色的含烃盐水包裹体(秦家屯地区)

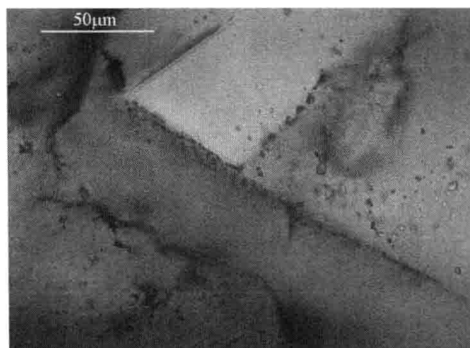


图 6-30 环石英颗粒加大边内侧成带分布呈深褐色、灰褐色的液烃、气液烃包裹体(秦家屯地区)

第二期油气包裹体主要发育于石英颗粒成岩期后或方解石胶结物充填期间或期后,包裹体主要为溶蚀成因、成群分布于长石颗粒中,或沿石英颗粒、方解石胶结物成岩期后微裂隙成带状分布,发育丰度仍然很高,在纵向上和平面上与第一期分布相似,纵向上登娄库组和沙河子组 GOI 高达 40% ±,在营城组只有 4% ±;平面上从 SN78 井到 SN148 井方向 GOI 丰度逐渐降低。由此研究人员认为该现象仍然是油气运移而导致的结果。此外,第二期包裹体内液烃呈无色、淡黄色、深褐色为主,显示绿色、黄绿色、暗褐色荧光;包裹体内气烃呈灰色,无荧光显示(图 6-31),本期油气包裹体以气液包裹体为主,表明本期包裹体内烃类以成熟烃为主。

2. 流体包裹体均一化温度

根据秦家屯地区储层砂岩样品盐水包裹体均一化温度测试结果,绘制了均一化温度分布直方图,通过分析可知 SN78 井登娄库组储层盐水包裹体均一化温度分布范围为 86 ~ 95℃;SN148 井营城组储层盐水包裹体均一化温度分布范围为 66 ~ 85℃;SN78 井沙河子组储层盐水包裹体均一化温度分布范围为 85 ~ 95℃(图 6-32)。

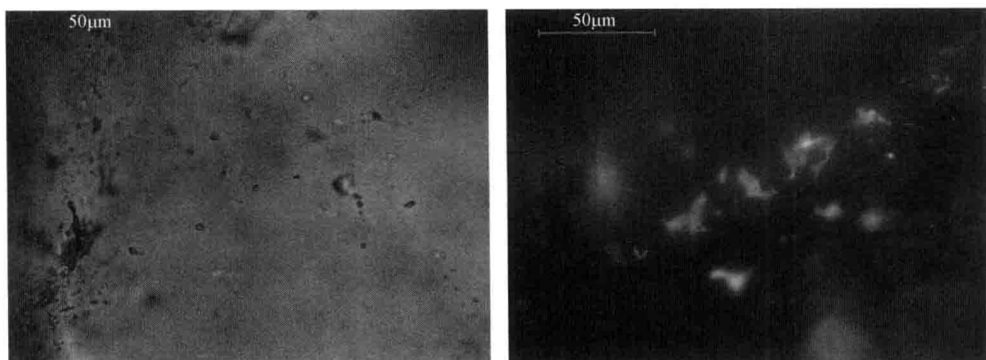


图 6－31　沿石英颗粒微裂隙成带分布,呈淡褐色—灰色的
气液烃包裹体,显示绿色荧光(秦家屯地区)

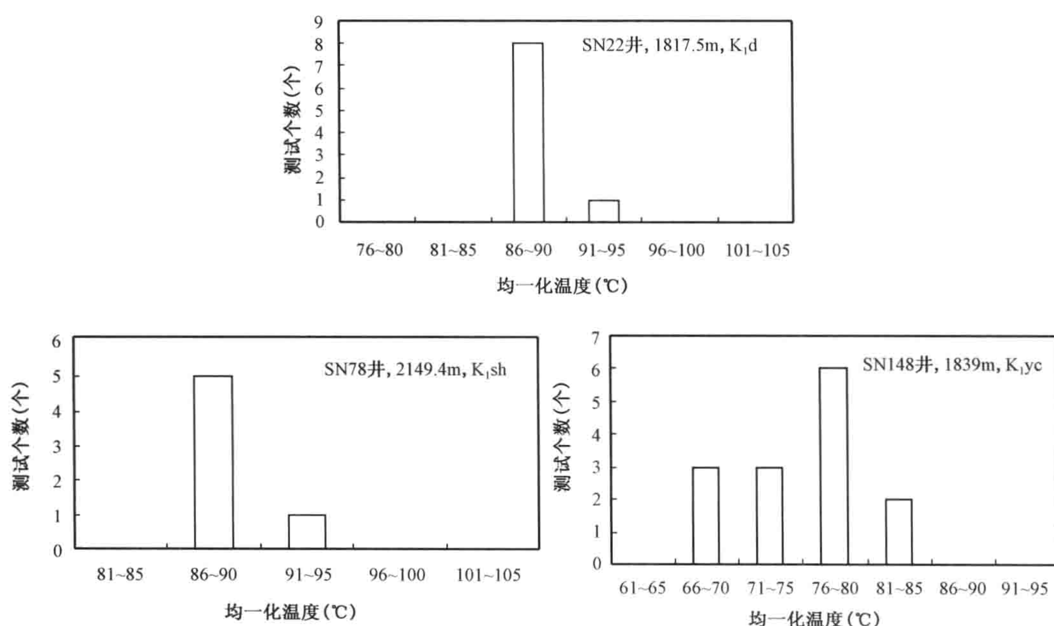


图 6－32　梨树断陷秦家屯地区 SN78 和 SN148 井包裹体均一化温度分布直方图

根据盐水包裹体测温显示,秦家屯地区 SN78 井登娄库组储层盐水包裹体均一化温度主峰位于 86～90℃。根据该井地层埋藏与热演化史图(图 6－33),该温度区间所对应的时间为 100—97Ma,即 SN78 井登娄库组油气成藏时期为泉头末期。

沙河子组也是秦家屯地区一套重要的储层,从 SN78 井沙河子组储层盐水包裹体均一化温度分析来看,其主峰主要位于 86～90℃区间。根据埋藏史恢复结果,可以看出沙河子组储层主要油气成藏时间为 109—106Ma,即 SN78 井沙河子组油气成藏时期为泉头早期。

SN148 井是秦家屯地区另外一口代表井,从该井的包裹体均一化温度资料来看,其营城组储层盐水包裹体均一化温度主峰区为 71～85℃,根据 SN148 井地层埋藏与热演化史图可得到其所对应的时间大致为 105—101Ma,该井营城组油气成藏时期主要为泉头中期(图 6－34)。

从以上分析可发现秦家屯地区不同层位油气藏成藏时期具有一定规律，登娄库组油气藏主要在泉头末期成藏，营城组油气藏主要在泉头中期成藏，沙河子组油气藏主要在泉头早期成藏。

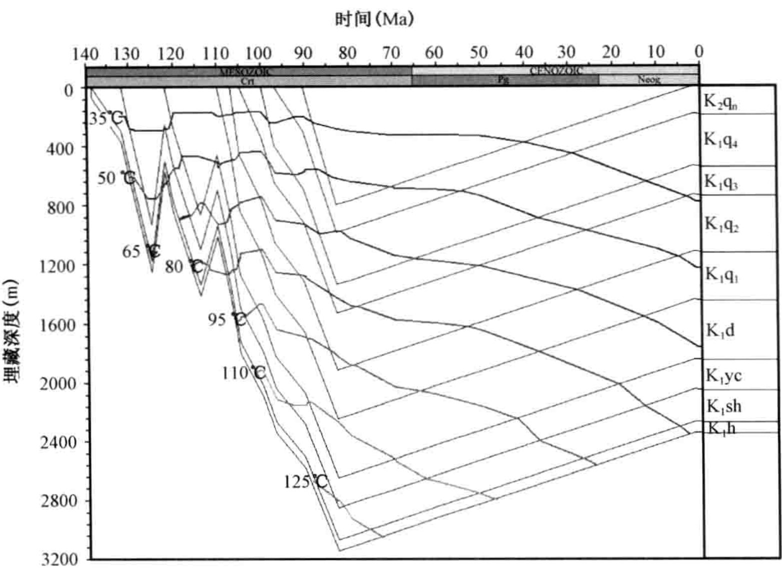


图 6-33　梨树断陷秦家屯地区 SN78 井时间—温度埋藏史图

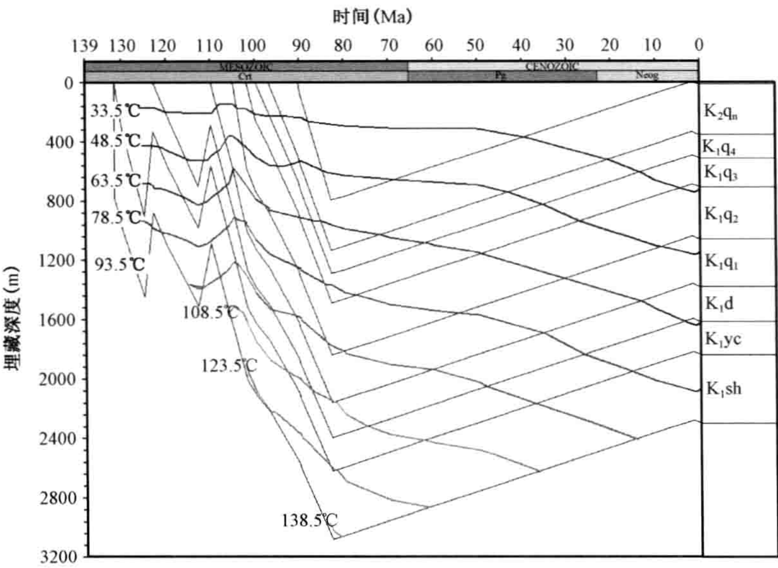


图 6-34　梨树断陷秦家屯地区 SN148 井时间—温度埋藏史图

综合盆地模拟埋藏史、油气运聚和流体包裹体分析结果，梨树断陷经历了三期油气成藏过程，即登娄库期、泉头期和泉头末期—嫩江期，而在不同地区不同地层油气成藏时期存在一定差异(表 6-1)。

表 6-1　梨树断陷油气成藏时期表

地区	井号	地层	包裹体均一化温度(℃)	成藏地质年代(Ma)	成藏期次
秦家屯	SN78	K_1d	86～95	100—97	泉头末期
	SN148	K_1yc	71～85	105—101	泉头中期
	SN78	K_1sh	86～95	109—106	泉头早期
双龙	SN22	K_1d	70～80	98—86	泉头末期—嫩江期
	SN117	K_1d	66～85	100—85	泉头末期—嫩江期
北部斜坡	SN144	K_1yc	65～72	104—100	泉头期
	SW3	K_1yc	76～86 107～115	107—105 103—102	泉头期
八屋	SN64	K_1yc	72～82 96～102	105—102 100—97	泉头期
	SN64	K_1sh	80～86 96～106	116—112 108—104	登娄库末期 泉头期
后五家户	SN79	K_1d	80～89	106—101	泉头期
	SN80	K_1yc	90～97 106～118	120—119 118—116	登娄库期
	SN80	K_1yc	90～97 110～120	120—119 118—116	登娄库期

第二节　油气运移方向

近年来,随着石油含氮化合物分析技术的突破,含氮化合物蕴含的地质—地球化学意义日益广泛应用于石油运移研究之中,使油气二次运移的研究由定性向定量研究方面的发展取得了长足的进展。原油含氮化合物主要指的是中性含氮化合物,如咔唑与苯并咔唑及其烷基衍生物。这是因为咔唑类化合物氮原子有一对孤对电子极易形成氢键而与周围矿物介质发生吸附作用。二甲基取代咔唑化合物为应用最为广泛的一类化合物,环碳 C1、C8 位上均有取代基的化合物,称之为 N-H 全屏蔽型化合物,如:1,8-二甲基咔唑;C1 或 C8 位上有一个取代基的化合物,称之为 N-H 半屏蔽型化合物,如:1,3-二甲基咔唑;C1 和 C8 位上均无取代基的化合物,称之为 N-H 裸露型化合物。因此,随着运移距离的增大,原油中性含氮化合物绝对浓度将会逐渐下降。此外,裸露型咔唑类化合物与周围介质吸附性最强,其次为部分屏蔽型,而屏蔽型化合物与周围介质的吸附性最差。故此,原油中不同类型咔唑化合物将随着原油运移距离的增加而发生运移分馏效应,结果使原油中屏蔽型化合物含量相对富集,而裸露型和部分屏蔽型咔唑类化合物因易于周围介质吸附,其含量逐渐降低。此外,随着运移距离的增加,原油含氮化合物的绝对浓度及总量都会逐渐减少。

一、石油运聚方向

已有的研究成果表明,原油中含氮化合物的绝对浓度与相对比值不仅受到运移分馏作用的影响,而且还受到烃源岩母质类型、成熟度与沉积环境等因素的影响,因此在利用原油含氮化合物来研究石油运移方向与途径时,首先要确定原油地球化学特征与成因类型,因为只有成因类型相同的原油才有可对比性。

梨树断陷原油按母质来源可划分为两种成因三种类型，第Ⅰ类原油储集在登娄库组及以上地层的成熟原油主要来源于营城组中下部烃源岩；而Ⅱ类原油聚集在沙河子及以下地层的高成熟原油来源于沙河子组中上部烃源岩；第Ⅲ类原油没有成因上的意义，是第Ⅰ类成因原油与第Ⅱ类成因原油的混合产物。

(一)断陷层浅层储层原油(Ⅰ类原油)的运移方向

这类原油为Ⅰ类原油，主要分布在秦家屯油气田和四五家子油气田。根据原油中性含氮化合物的运移分馏效应，笔者选取了1,8-/1,3-二甲基咔唑(1,8-/1,3-DMCA)、1,8-/2,7-二甲基咔唑(1,8-/2,7-DMCA)和含氮化合物总量(μg/g)参数作为梨树断陷石油运移含氮化合物的指标，并绘制了Ⅰ类原油含氮化合物绝对浓度与相对比值的变化规律以及运移方向图(图6-35)。通过1,8-/1,3-二甲基咔唑和1,8-/2,7-二甲基咔唑两参数可以明显看出，四五家子油气田的高值区主要位于W20-4井和W20-5井，整体呈现SW—NE向增大的趋势。秦家屯油气田上述两参数值在东北端QK129-1井出现最高值，分别达到5.83和6.24，同样整体呈现SW—NE向增大的趋势。由此可以看出，整体上Ⅰ类原油呈现出自SW向NE的运移方向，指示其原油来源于断陷西南部的洼陷带。根据秦家屯地区泉头组顶面构造图显示该区为西南倾向斜坡带，图6-35秦家屯西南端的QK1-2井和SN78井处于构造相对低点，沿SW—NE方向，地层逐渐抬升，含氮化合物的地球化学参数也显示出原油随地层的抬升运移聚集的特点。同样四五家子油气田也是如此，W20-4井和W20-5井相对于其西南部的井位处于构造高点，含氮化合物也显示沿地层上倾方向石油运移聚集的特点。

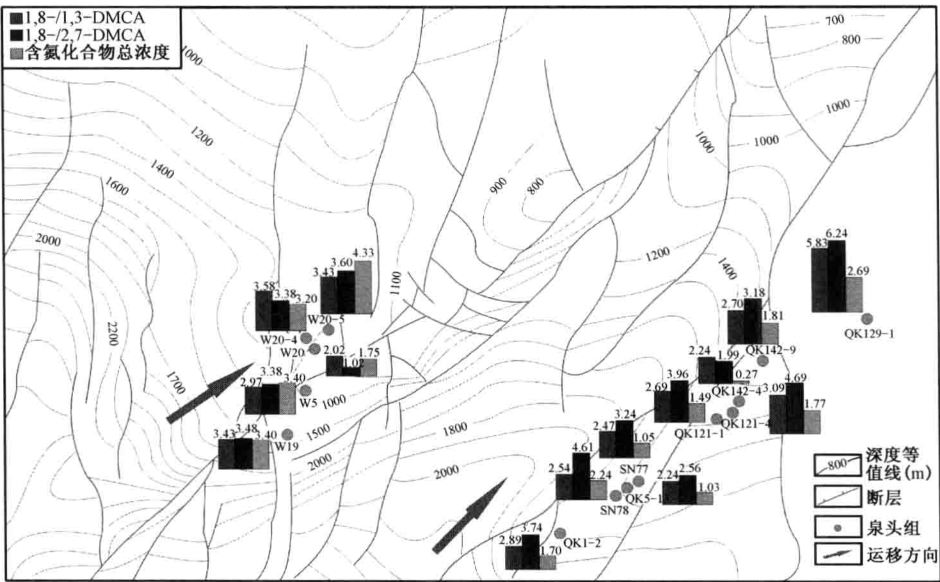


图6-35 梨树断陷Ⅰ类原油含氮化合物参数与石油运移方向

(二)断陷层深层储层原油(Ⅱ类原油)的运移方向

这类原油为Ⅱ类原油，主要分布于八屋油气田SN54区块和BK60区块，李家屯地区HS2井以及七棵树油气田SW9井和SW11井。原油含氮化合物绝对浓度、1,8-/1,3-二甲基咔唑(1,8-/1,3-DMCA)与1,8-/2,7-二甲基咔唑(1,8-/2,7-DMCA)参数与原油的运移方向如图6-36所示。

八屋油气田 SN54 区块和 BK60 区块靠近小宽断裂带，输导体系不仅有连续的砂体也有断层与不整合面，使得原油含氮化合物在不同输导体系运移分馏效应的程度不一致，导致原油菌茴化合物的运移参数趋势出现异常。如 SW1 井和 SW103 井原油异常的参数值可能是由于断层作为该原油运移通道所致。此外，靠近断裂带的 BK61-2 井原油 1,8-/1,3-二甲基咔唑、1,8-/2,7-二甲基咔唑要明显高于其西北方向的其他三口井。因此，该区块原油运移方向与路径可能较为复杂，但整体上原油仍呈 SW—NE 向运移方向，即自洼陷带向该隆起区的运聚特征。小宽断裂带可能起到了较为重要的原油运移通道的作用，油气沿着小宽断裂带向北东运移至该区块附近，受南北向断层控制，油气侧向运移聚集在砂体储层中。

在东南斜坡带上，从李家屯地区 HS2 井到七棵树地区 SW9 井和 SW11 井，原油含氮化合物呈现出有规律的变化趋势（图 6-36），七棵树 SW9 井和 SW11 井 1,8-/1,3-二甲基咔唑、1,8-/2,7-二甲基咔唑高于 HS2 井，最为明显的为原油中性含氮化合物绝对浓度，其值在 HS2 井为 36.3μg/g，而在 SW9 井和 SW11 井原油中其值小于 2.0μg/g，暗示原油随着运移距离的增加，原油含氮化合物的总量出现明显的下降。由此来看，对于该区沙河子组Ⅱ类原油，运移聚集方向同样为 SW—NE 向。整体来讲，该区原油运移聚集仍然主要受控于构造条件，从西南方向沿地势上倾方向向东北部运移充注。

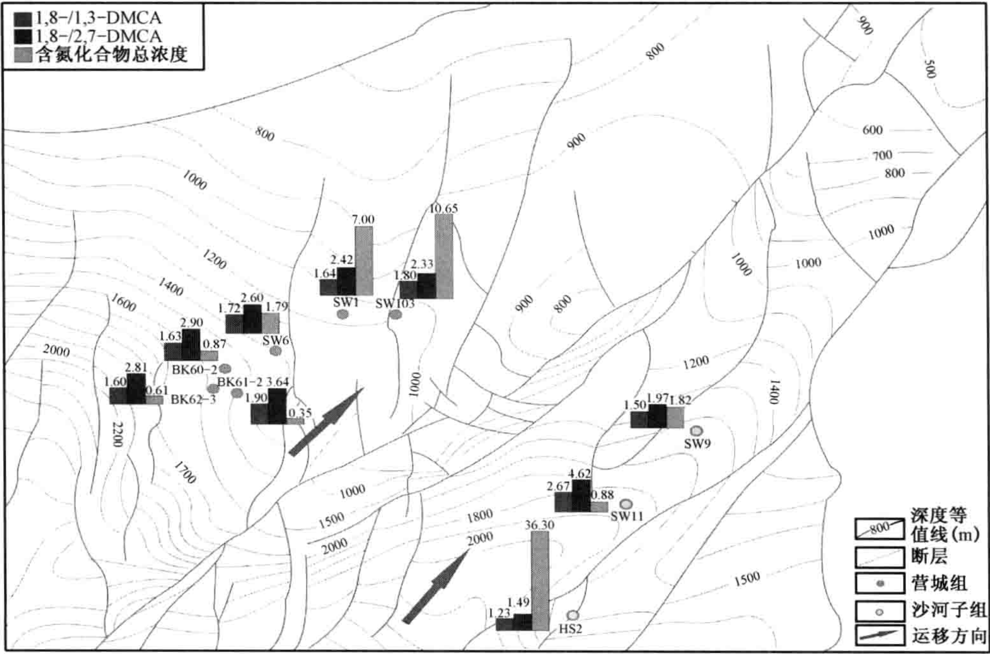


图 6-36　梨树断陷Ⅱ类原油含氮化合物参数与石油运移方向

（三）混源油区

梨树断陷的第三种原油类型为Ⅰ类原油和Ⅱ类原油的混源油，这类原油主要分布在八屋地区、七棵树地区和太平庄—双龙地区三个不同区块的营城组、沙河子组和火石岭组层位。

1. 八屋地区营城组油藏

八屋地区营城组原油 1,8-/1,3-二甲基咔唑和 1,8-/2,7-二甲基咔唑比值虽然差异性不大，但在 SN165 井这些参数到达最大值，特别是理论上分馏效果更好的 1,8-/2,7-二甲基咔唑比值为最高值，说明其应位于原油运移的更远端（图 6-37）。而原油含氮化合物的总

量更是显示出良好的分布规律，位于该区南部的 BK20 - 5 井、BK20 - 9 井、BK203 - 7 井、BK203 - 9 井和 SN203 井其值分布于 8.59 ~ 12.83μg/g 之间；而北部的 SN165 井、SW101 井和 BK20 - 6 井原油其值范围仅为 0.68 ~ 0.79μg/g 之间，显示其原油具有更远的运移距离，由此来看，可能存在一个南北向的原油运移聚集方向（图 6 - 37）。从构造特征分析，与Ⅰ类原油和Ⅱ类原油情况一致，受地层倾向的控制，原油先沿 SW—NE 整体运聚，然后在该区原油沿南北方向向构造高点汇聚。

2. 七棵树—太平庄地区沙河子组油藏

七棵树—太平庄地区沙河子组油藏原油含氮化合物组成变化规律性亦非常明显（图 6 - 37）。位于该区西南部的 SW8 井和 SW10 井原油样品 1,8 -/1,3 - 二甲基咔唑和 1,8 -/2,7 - 二甲基咔唑两比值相对较低值，前者比值分别为 1.96 和 1.76，而后者比值分别为 2.74 和 2.58；位于东北部的 SN153 井该比值分别为 2.09 和 3.43，说明该地区东北部构造隆起区是油气有利的聚集带，进一步反映出原油可能存在 SW—NE 方向的运移聚集，这一结论也被原油含氮化合物总量的变化所证明。SW8 井和 SW10 井原油含氮化合物总量分别为 23.97μg/g 和 18.26μg/g，而 SN153 井原油含氮化合物总量下降为 1.75μg/g，同样指示原油存在由 SW8 井和 SW10 井向 SN153 井运移方向。

3. 太平庄—双龙地区火石岭组油藏

太平庄—双龙地区火石岭组油藏原油 1,8 -/1,3 - 二甲基咔唑和 1,8 -/2,7 - 二甲基咔唑比值在太平庄地区 SW12 井原油中分别为 1.24 和 1.23，而在双龙地区 SW20 井原油中分别为 1.42 和 1.47，说明从太平庄地区的 SW12 井到双龙地区的 SW20 井这两个参数逐渐变大，暗示原油可能存在从 SW—NE 的运移方向（图 6 - 37）。另外，原油含氮化合物的总量在 SW12 井为 15.47μg/g，在 SW20 井为 0.65μg/g，运移分馏作用也非常明显，指示这些原油太平庄地区向双龙地区存在一个石油的运移方向与途径。

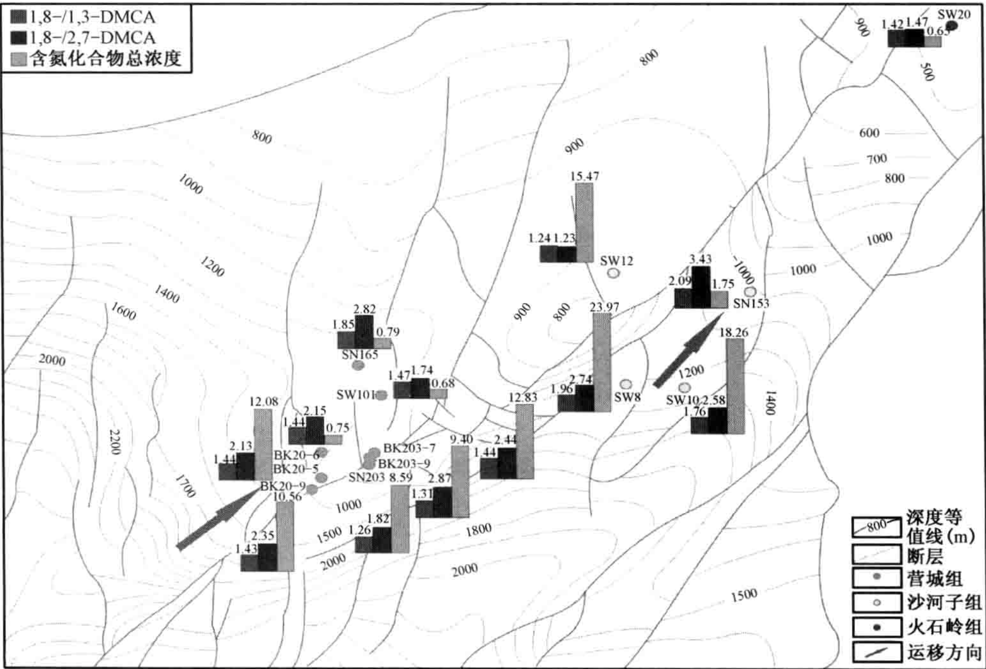


图 6 - 37 梨树断陷混源油含氮化合物参数与石油运移方向

二、原油运聚模式

对于多套烃源岩层、多期构造运动、多期成藏过程的叠合断陷盆地而言,油气的运移、充注与聚集成藏过程的研究就显得尤其重要。笔者在对梨树断陷烃源岩与油气地球化学特征的系统研究基础上,运用油气成藏地球化学的理论与方法,试图通过不同地区油气藏的剖析,探讨梨树断陷原油运移聚集成藏的特征与模式。

图6-38展示了东南斜坡带秦家屯地区SN78井油藏原油充注成藏的过程。根据泉Ⅱ段原油、登娄库组和沙河子组储层烃的甾萜化合物组成特征,从上到下,原油m/z 191和m/z 217质量色谱图生物标志化合物的含量呈现出规律性变化。储层层位逐渐变深,原油中C_{28}和C_{29}三环萜烷含量逐渐增加,Ts、C_{29}Ts和C_{30}重排藿烷含量则逐渐增加,C_{29}甾烷$\alpha\beta\beta$化合物含量也逐渐增大。根据梨树断陷不同类型原油地球化学特征可以看出,深层沙河子组原油明显具有Ⅱ类原油之特点,浅层泉头组原油则具有Ⅰ类原油的特点,而登娄库组烃类分子组成特征介于两者之间,为典型混源型。

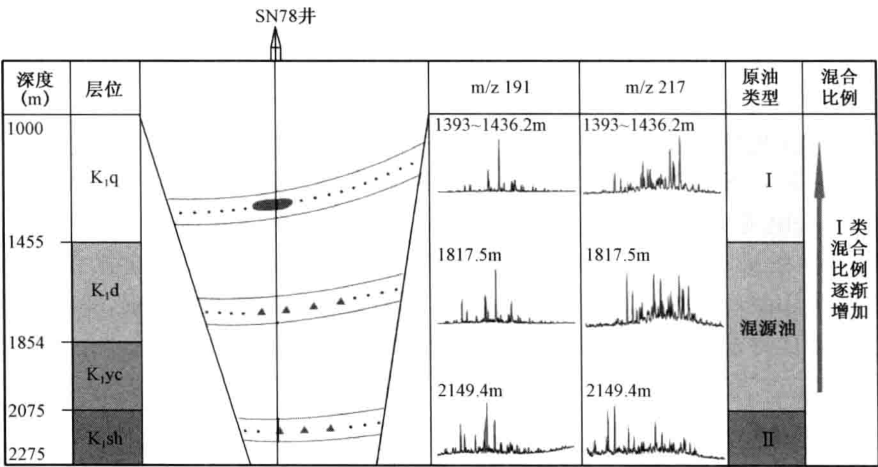


图6-38　梨树断陷秦家屯地区原油纵向运移充注模式图

另外,北部斜坡带代表井SW107井烃类生物标志化合物组合的变化规律与秦家屯地区油藏烃类特征变化一致。如图6-39所示,从营城组到沙河子组,原油C_{28}和C_{29}三环萜烷、Ts、C_{29}Ts和C_{30}重排藿烷和伽马蜡烷等化合物丰度明显增大。深层沙河子组原油为Ⅱ类原油,而营城组原油为混源油。

综上所述,梨树断陷不同储层烃类化合物在纵向上的非均质性发育普遍,东南斜坡带与北部斜坡带典型油藏烃类地球化学特征的剖析表明,这种非均质性不仅展示了不同类型原油的分布特征,而且还揭示了两种来源油的运移、充注与混合聚集成藏过程。来源于营城组烃源岩的原油主要运移聚集在泉头组和登娄库组等相对较浅的地层中;而来源于沙河子组烃源岩的原油则主要运移聚集在沙河子组等相对较深的储层中,而同时接受上述两套烃源岩供烃的混源油则主要运移聚集在登娄库组和营城组等中间储层层段里。

梨树断陷东南斜坡带上不同类型原油运聚特征如图6-40所示。对于同为Ⅱ类原油的HS2井和SW9井,通过含氮化合物绝对浓度和相对比值,以及成熟度参数变化特征指示原油具有SW—NE运移方向。原油自洼陷带沙河子组主力烃源岩排烃之后,通过断层、不整合面和连续砂体,沿沙河子组地层上倾方向向斜坡带运聚,遇到适当的圈闭聚集成藏。对于七棵树

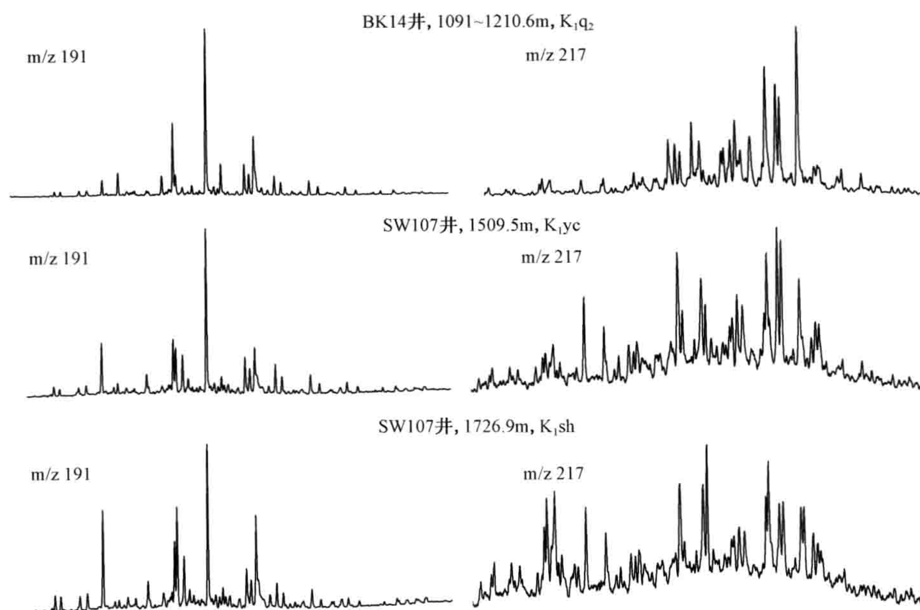
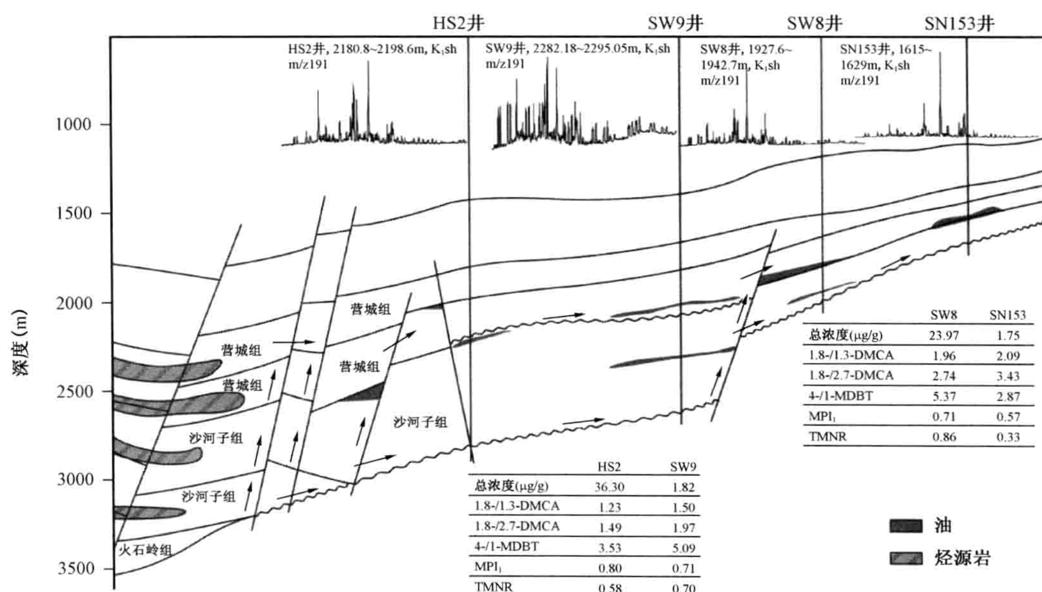


图 6－39　梨树断陷北部斜坡带原油纵向上甾萜组成变化图

地区 SW8 井和 SN153 井的混源油，含氮化合物绝对浓度和相对比值，以及成熟度参数变化规律同样指示原油具有 SW—NE 运移方向。营城组和沙河子组烃源岩自洼陷带生排烃之后，原油主要通过断层与不整合面以及连续砂体，在二次运移初期沙河子组生成的Ⅱ类原油可能就已经通过与深湖—半深湖相泥岩互层叠片分布的连续砂体，向斜坡带运移，同时在斜坡带沿断层向上运移与营城组烃源岩生成的Ⅰ类原油发生混合，然后继续沿北东向地层上倾方向运聚成藏。另外，当Ⅱ类原油聚集成藏后，后续原油继续聚集，使得该类原油继续沿断层向上运移，此时再与Ⅰ类原油发生混合作用，在合适的圈闭中聚集成藏。



	SW8	SN153
总浓度(μg/g)	23.97	1.75
1.8-/1.3-DMCA	1.96	2.09
1.8-/2.7-DMCA	2.74	3.43
4-/1-MDBT	5.37	2.87
MPI_1	0.71	0.57
TMNR	0.86	0.33

	HS2	SW9
总浓度(μg/g)	36.30	1.82
1.8-/1.3-DMCA	1.23	1.50
1.8-/2.7-DMCA	1.49	1.97
4-/1-MDBT	3.53	5.09
MPI_1	0.80	0.71
TMNR	0.58	0.70

图 6－40　梨树断陷原油运移模式图

在区域运聚特征分析之上，可总结出梨树断陷油气运聚模式。优质烃源岩分布于断陷西南部洼陷带已是毋庸置疑，无论从有机质丰度、类型还是成熟度，其必定生成过大量的油气。主力烃源岩分布、油源对比结果、原油运移分馏效应和古构造演化特征等都揭示出梨树断陷各类原油总体呈现由洼陷带沿 SW—NE 向斜坡区构造高部位运聚的特征。在此过程中，Ⅰ类原油自营城组生成以后，沿断层、不整合面和连续砂体多在泉头组和登娄库组聚集成藏；Ⅱ类原油自沙河子组生成以后多在沙河子组聚集成藏；混源油则由Ⅱ类原油沿断层向上，与Ⅰ类原油混合后多在营城组聚集成藏。

参 考 文 献

陈致林,李素娟,王忠. 1997. 低—中成熟演化阶段芳烃成熟度指标的研究. 沉积学报,15(2):193~197.

程克明,顾信章. 1983. 沥青质的地球化学性质及其对母岩有机质的分类意义. 石油勘探与开发,5:23~33.

程克明,王铁冠,钟宁宁. 1995. 烃源岩地球化学. 北京:科学出版社.

戴金星,夏新宇,秦胜飞,等. 2003. 中国有机烷烃气碳同位素系列倒转的成因. 石油与天然气地质,24(1):1~6.

戴金星,邹才能,张水昌,等. 2008. 无机成因和有机成因烷烃气的鉴别. 中国科学D辑:地球科学,38(11):1329~1341.

戴金星,裴锡古,戚厚发. 1992. 中国天然气地质学(卷一). 北京:石油工业出版社.

戴金星. 1993. 天然气碳氢同位素特征和各类天然气鉴别. 天然气地球科学,5(1-2):1~40.

戴金星. 1993. 利用轻烃鉴别煤成气和油型气. 石油勘探与开发,20(5):26~32.

胡见义,黄第藩,等. 1991. 中国陆相石油地质理论基础. 北京:石油工业出版社.

胡惕麟,戈葆雄,张义纲,等. 1990. 源岩吸附烃和天然气轻烃指纹参数的开发应用. 石油实验地质,12(4):375~379.

蒋助生,罗霞,李志生,等. 2000. 苯、甲苯碳同位素组成作为气源对比新指标的研究. 地球化学,29(4):410~415.

李德生. 1982. 中国东部含油气盆地的构造特征. 石油勘探与开发,2:1~14.

李君,黄志龙,王海. 2006. 烃源岩生烃时效性对油气分布的控制作用——以松辽盆地南部东南隆起区梨树断陷为例. 天然气工业,26(9):14~16.

李美俊,王铁冠. 2005. 原油中烷基萘的形成机理及其成熟度参数应用. 石油实验地质,27(6):606~623.

李丕龙,等. 2003. 陆相断陷盆地油气地质与勘探. 北京:石油工业出版社.

卢双舫,张敏,等. 2005. 油气地球化学. 北京:石油工业出版社.

罗志立. 1984. 略论地裂运动与中国油气分布. 中国地质科学院院报,10:93~101.

孟卫工. 2006. 断陷盆地复杂斜坡带油气分布与成藏规律研究. 成都:西南石油大学.

秦胜飞. 1999. 塔里木盆地库车坳陷异常天然气的成因. 勘探家,4(3):21~23.

田在艺,等. 1996. 中国含油气沉积盆地论. 北京:石油工业出版社.

王春江,傅家谟,盛国英,等. 2000. 18α(H)新藿烷及17α(H)重排藿烷类化合物的地球化学属性与应用. 科学通报,45(13):1366~1372.

王启军,陈建渝. 1988. 油气地球化学. 北京:中国地质大学出版社.

王涛,等. 1997. 中国东部裂谷盆地油气藏地质. 北京:石油工业出版社.

王铁冠,王春江,何发岐,等. 2004. 塔河油田奥陶系油藏两期成藏原油充注比率测算方法. 石油实验地质,26(1):74~79.

王铁冠. 1992. 树脂生源未成熟烃源岩的生物标志物组合及其地质意义. 中国科学B辑,7:751~758.

邬立言,顾信章,盛志伟,等. 1986. 生油岩热解快速定量评价. 北京:科学出版社.

吴志勇,罗斌杰. 1992. 天然气运移地质色层效应机理和指标探讨. 沉积学报,10(2):119~125.

熊波,李贤庆,马安来,等. 2001. 全岩显微组分定量统计及其在烃源岩评价中的应用. 江汉石油学院学报,23(3):16~20.

徐永昌,刘文汇,沈平. 2003. 天然气地球化学的重要分支——稀有气体地球化学. 天然气地球科学,14(3):157~166.

徐永昌,沈平. 1985. 中原、华北油气区煤型气地化特征初探. 沉积学报,(2):40~49.

许晓宏,黄海平,卢松年. 1998. 测井资料与烃源岩有机碳含量的定量关系研究. 江汉石油学院学报,20(3):8~12.

杨万里,高瑞祺,郭庆福,等. 1985. 松辽盆地陆相油气生成运移和聚集. 哈尔滨:黑龙江科学技术出版社.

叶连俊,孙枢.1980. 沉积盆地的分类. 石油学报,1(3):1~6.
俞凯,侯洪斌,郭念发,等.2002. 松辽盆地南部断陷层系石油天然气地质. 北京:石油工业出版社.
翟光明,高伟亮,等.2005. 中国石油地质学. 北京:石油工业出版社.
张春明. 双环倍半萜的分布特征及其地球化学意义,江汉石油学院学报,2002,24(2):30 ~33.
张立鹏,边瑞雪,杨双彦等.2001. 用测井资料识别烃源岩. 测井技术,25(2):146~152.
张敏,张俊,张春明.1999. 塔里木盆地原油轻烃地球化学特征. 地球化学,28(2):191~196.
张敏,林壬子,梅博文.1997. 油藏地球化学—塔里木盆地库车含油气系统研究. 重庆:重庆大学出版社.
张文昭.1997. 中国陆相大油田. 北京:石油工业出版社.
张小莉,沈英.1998. 吐哈盆地侏罗系煤系地层烃源岩的测井研究. 测井技术,22(3):183~185.
张义纲,章复康,等.1987. 识别天然气的碳同位素方法. 有机地球化学论文集. 北京:地质出版社.
郑建京,胡慧芳,刘文汇,等.2005. K-Ar 关系在天然气气源对比研究中的应用. 天然气地球科学,16(4):499~502.
朱夏.1983. 试论古全球构造与古生代油气盆地,石油与天然气地质,4(1):1~33.
Tissot B P.,Welte D H. 著. 徐永元,徐濂,郝石生,等,译.1989. 石油形成与分布. 第2版. 北京:石油工业出版社.
Berner U,Faber E. 1988. Maturity related mixing model for methane, ethane and propane, based on carbon isotopes. Organic Geochemistry,13(1-3):67~72.
Berner U,Faber E,Scheeder G. 1995. Primary cracking of algal and landplant kerogens:kinetic models of isotope variations in methane,ethane and propane. Chemical geology,126:233~245.
Boreham C J,Edwards D S,et al. 2008. Carbon and hydrogen isotopes of neo-pentane for biodegraded natural gas correlation. Organic Geochemistry,39(10):1483~1486.
Charlesworth J M. 1986. Interaction of clay minerals with organic nitrogen compounds released by kerogen pyrolysis. Geochimica et Cosmochimica Acta,50:1431~1435.
Chen M. 1995. Response of Pyrrolic and Phenic compounds to Petroleum migration and in reservoir Proeesses. Ph. D. Thesis. University of Newcastle upon Tyne. U. K.
Chung H M,Gormly J R. 1988. Origin of gaseous hydrocarbons in subsurface environments:theoretical considerations of carbon isotope distribution. Chemical Geology,71:97~103.
Claypool G E,Threlkeld C N,et al. 1980. Biogenic and thermogenic origins of natural gas in Cook Inlet basin,Alaska. AAPG,64(8):1131~1139.
England W A,Mackenzie A S,Mann D M,et al. 1987. The movement and entrapment of petroleum in the subsurface. Journal of Geological Society,144:327~347.
England W A,Maekenzie A S. 1989. Geochemistry of Petroleum reservoirs. Geologische Rundschau,78:214~237.
England W A,Muggeridge A H,Clifford P J,et al. 1995. Modelling density-driven mixing rates in Petroleum reservoirs on geological time-seales,with application to the detection of barriers in the Forties Fields(UKCS). In Cubitt J W,England W A(eds). The geochemistry reservoirs. Geological Society Special Publications 86. London: The Geological Soeiety Publishing House:185~202.
Gussow W C. 1954. Differential entrapment of oil and gas:a fundamental Principle. AAPG Bulletin,38:816~853.
Hakan Hosgormez,Yalcm M N. 2005. Gas-source rock correlation in Thrace basin,Turkey. Marine and Petroleum Geology,22(8):901~916.
Herron S L,Letendre I,Dufour M. 1988. Source rock evaluation using geochemical information from wire line logs and cores. AAPG Bulletin,72:1007.
Hughes W B,Holba A G,Dzou L I P. 1995. The ratios of dibenzothiophene to phenanthrene and pristane to phytane as indicators of depositional environment and lithology of petroleum source rocks. Geochimica et Cosmochimica Acta, 59(17): 3581~3598.

Hunt J M, Miller R J, Whelan J K. 1980. Formation of C_4 - C_7 hydrocarbons from bacterial degradation of naturally occurring terpenoids. Nature, 288: 577 ~ 578.

Ichiro Kaneoka I, Takaoka N. 1985. Noble - gas state in the earth's interior - Some constraints on the present state. Chemical Geology: Isotope Geoscience section, 52(1): 75 ~ 95.

Larter S R, Aplin A C. 1994. Reservoir Geoellelnistry: A link between reservoir geology and engineering? SPE, 441 ~ 450.

Larter S R, Bowler B F J, Li M, et al. 1996. Molecular indicators of secondary oil migration distances. Nature, 383 (17): 593 ~ 597.

Larter S R, Horstad I. 1992. Migration of hydroearbons into Brent Group Reservoirs - some observations from the Gullfasks Field, TamPen Spur Area North Sea. Geology of the Brent Group, Geological Society, Special Publication, 61: 441 ~ 452.

Leythaeuser D, Schaefer R G, et al. 1979. Generation and migration of light hydrocarbons (C_2 - C_7) in sedimentary basins. Organic Geochemistry, 1(4): 191 ~ 204.

Li M, Larter S R, Stoddart D, et al. 1995. Fractionation of Pyrrolic nitrogen compounds in petroleum during migration: derivation of migration—related geoehemical Parameters. Cubitt J, England W A(eds). The Geoehemistry of Reservoirs. Geological Society Special Publications 86. London: The Geological Society Publishing House: 103 ~ 123.

Lorant F, Prinzhofer A, et al. 1998. Carbon isotopic and molecular constraints on the formation and the expulsion of thermogenic hydrocarbon gases. Chemical Geology, 147(3 - 4): 249 ~ 264.

Mango F D. 1987. An invariance in the isoheptanes of petroleum. Science, 273: 514 ~ 517.

Mango F D. 1990. Pre - steady - state kinetics at the onset of petroleum generation. Organic Geochemistry, 16(1 - 3): 41 ~ 48.

Mango F D. 1997. The light hydrocarbons in petroleum: a critical review. Organic Geochemistry, 26 (7 - 8): 417 ~ 440.

Mann U P, Muller J. 1988. Source rock evaluation by well log analysis (Lower Toarcian, Hils Synline): Advances in Organic Geochemistry, 13: 109 ~ 129.

Meyer B L, Nederlof M H. 1984. Identification of source rocks on wire line logs by density/resistivity and sonic transit time/resistivity cross plots. AAPG Bulletin, 68: 121 ~ 129.

Moldowan J M, Fago F J, Carlson R M K, et al. 1991. Rearranged hopanes in sediments and petroleum. Geochemica et Cosmochimica Acta, 55: 3333 ~ 3353.

Passey Q R, Creaney S, Kulla J B. 1990. A practical model for organic richness from porosity and resistivity logs. AAPG Bulletin, 74(5): 1777 ~ 1794.

Peters K E, Moldowan J M. 1993. The Biomarker Guide: Interpreting Molecular Fossils in Petroleum and Ancient Sediments. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ: 88.

Peters K E, Walters C C, Moldwan J M. 2005. The biomarker guider, 2nd Edition. New York: Cambridge University Press.

Radke M, Welte D H, Willsch H. 1982. Geochimical study on a well in the Western Canada Basin: relation of the aromatic ditribution pattern to maturity of organic matter. Geochimica et Cosmochimica Acta, 46: 1 ~ 10.

Radke M, Welte D H. 1981. The methylphenanthrene index (MPI): a maturity parameters based on aromatic hydrocarbons. In: Advance in Organic Geochemistry, 504 ~ 512.

Schmoker J W, Hester T C. 1983. Organic carbon in Bakken formation, United States portion of Williston basin. AAPG Bulletin, 67: 2165 ~ 2174.

Schmoker J W. 1981. Determination of organic - matter content of Appalachian Devonian shales from gamma ray logs. AAPG Bulletin, 65: 1285 ~ 1298.

Selllnirter J M, Arpino P J. 1985. Azaarenes in fuels. Mass Spectrometric Review, 4: 87 ~ 121.

Stahl W J, Carey B D Jr. . 1975. Source – rock identification by isotope analyses of natural gases from fields in the Val Verde and Delaware basins, west Texas. Chemical Geology, 16(4):257 ~ 267.

Ten Haven H L. 1996. Applications and limitations of Mango's light hydrocarbon parameters in petroleum correlation studies. Organic Geochemistry, 24(10 – 11):957 ~ 976.

Thompson K F M. 1983. Classification and thermal history of petroleum based on light hydrocarbons. Geochimica et Cosmochimica Acta, 47:303 ~ 316.

Thompson K F M. 1987. Fractionated aromatic petroleums and the generation of gas – condensates. Organic Geochemistry, 47:303 ~ 316.

Tissot B P, Welte D H. 1978. Petroleum Formation and Occurrence. Berlin: Springer – Verlag.

Tissot B P. 1969. Premieres donnees sur les mecanismes et al cinetique des sediments: application d'unc simulation mathematique. Revue de 1'Institut Francais du Petrole, (France), 30:743 ~ 777.

van Aaressen B G K, Hessels J K C, Abbink O A, et al. 1992. The occurrence of polycyclic sesqui –, tri – and oligoterpenoids derived from a resinouse polymeric cadinene in crude oils form South East Asia. Geochimica et Cosmochimica Acta, 56:1231 ~ 1246.

van Aarssen B G K, Bastow T P, Alexander R, et al. 1999. Distributions of methylated naphthalenesin crude oils: indicatorsof maturity, biodegradation and mixing. Organic Geochemistry, 30:1213 ~ 1227.

Yamamoto M. 1992. Fraerionation of azarenes during oil migration. Organic Geoehemistry, 19:389 ~ 402.

Yamarnoto M, Taguchi K, Sasaki K. 1991. Basic nitrogen compounds in bitumen and crude oils. Chemical Geology, 93:193 ~ 206.

[General Information]
书名=松辽盆地梨树断陷油气生成
作者=张敏，李洪波，陈小慧等著
页数=160
SS号=13597750
DX号=
出版日期=2014.04
出版社=石油工业出版社